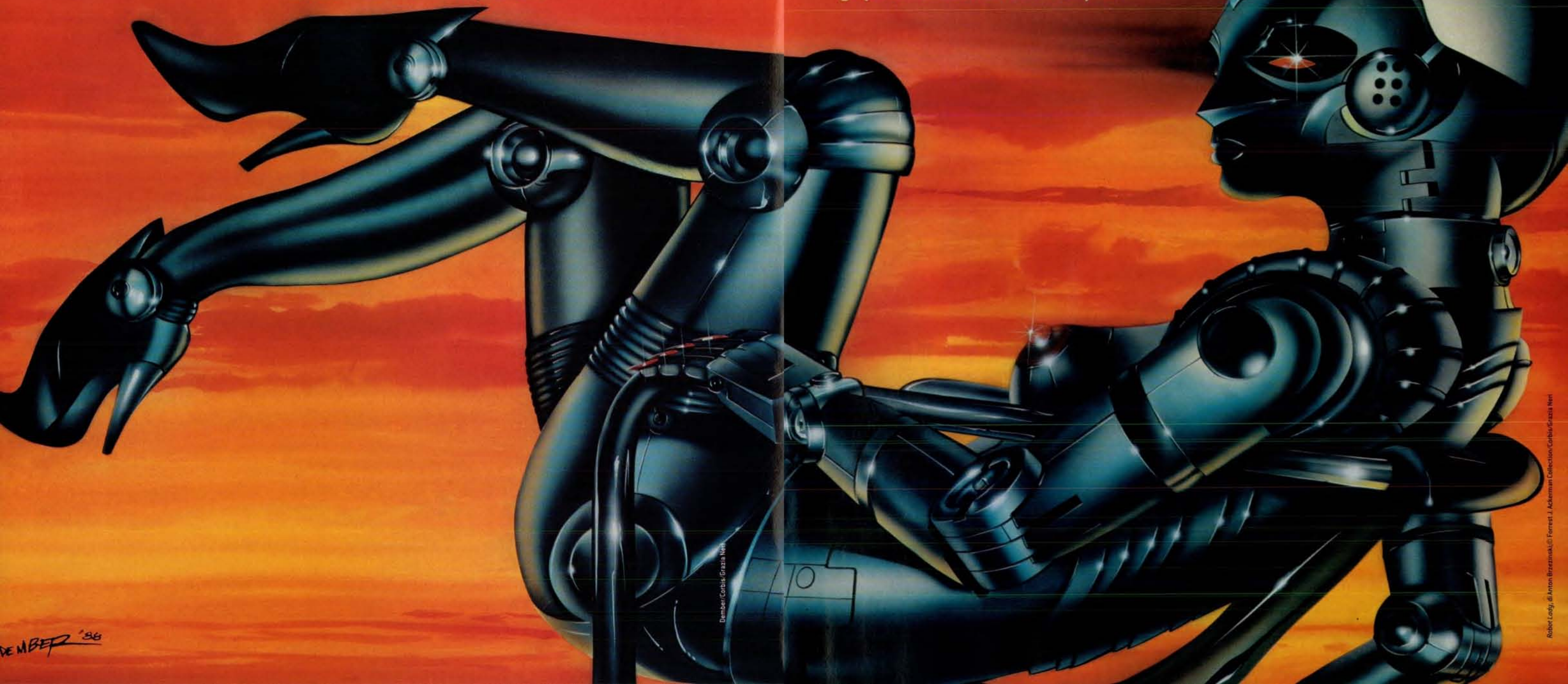
Le macchine che verranno

A. I. - Artificial Intelligence ha riportato alla ribalta un campo della ricerca che suscita speranze e inquietudini. Robot intelligenti, robot emotivi, nanorobot, persino robot che si riproducono. Nelle pagine che seguono, abbiamo raccolto un panorama, per quanto sintetico, sullo stato dell'arte in robotica e Intelligenza artificiale, e sulle prospettive nell'immediato futuro. Il quadro che ne esce è quello di un settore fortemente interdisciplinare in rapido mutamento, di una continua fioritura di nuove soluzioni e di nuovi problemi.

Entro pochi anni saremo circondati da macchine «intelligenti» in grado di prendere decisioni autonome al posto nostro e di eseguire compiti sempre più delicati, o ancora da «robot da intrattenimento» molto più evoluti e interattivi di quelli oggi in commercio. Per il momento, però, la prospettiva di un robot umanoide in grado di superare il famoso test di Turing resta argomento di fantascienza, anche se la velocità con cui evolve la tecnologia potrebbe riservarci curiose sorprese.

Dember/Corbis/Grazia Neri

Robot Lady, di Anton Brzezinski, © Forrest J. Ackerman Collection/Corbis/Grazia Neri

Con il film di Steven Spielberg si torna a parlare di robot «umani». Ma quanto la realtà è vicina alla fantasia? Siamo andati al Laboratory of Artificial Intelligence del MIT, dove gli esperti in materia ci hanno confermato che la strada è ancora lunga

di Marco Cattaneo

Cortesia Warner Bros.

A.I. tra sogno e realtà

Intelligenza è una parola grossa. Tanto che ancora ai nostri giorni neurofisiologi e scienziati cognitivi non sono riusciti a stabilirne una definizione precisa. E così l'Intelligenza artificiale, uno dei concetti più fecondi degli ultimi cinquant'anni - almeno nella fantasia di scrittori e registi - è basata su un termine terribilmente fragile e controverso. Ancora peggio se l'obiettivo dell'Intelligenza artificiale è quello di riprodurre l'intelligenza umana: quel complesso di memoria, apprendimento, elaborazione, controllo e «coscienza» che abita nel nostro cervello e che fa dell'uomo una specie «evoluta» e «tecnologica». O, come si dice, una specie dotata di «intelligenza superiore». Dimenticata dalle cronache - e in parte anche dai finanziamenti per la ricerca negli ultimi vent'anni - l'Intelligenza artificiale torna a far parlare di sé con A.I.- Artificial Intelligence, l'ultimo parto di Steven Spielberg, nato da un'idea di Stanley Kubrick e in uscita nelle nostre sale. In A.I., Haley Joel Osment è David, un ragazzino di undici anni. David studia, ride, gioca come ogni bambino della sua età. Si innamora, si commuove, si arrabbia. Né più né meno come un ragazzino di undici anni. E invece David è un robot umanoide. Anzi umano. Talmente umano che degli umani condivide aspirazioni, curiosità, progetti, emozioni. Per farla breve, è il sogno coronato di qualche migliaio di ostinati informati-

Cortesia Warner Bros.

ci, ingegneri e fisici che da mezzo secolo si arrovellano intorno all'idea di costruire una macchina dal volto umano, capace di manifestare un'intelligenza umana.

Negli States, il film di Kubrick non ha avuto un'accoglienza particolarmente felice. Paul Clinton, critico cinematografico della CNN, ha sottolineato che non ha né il calore familiare di *E. T.* né la gelida precisione *di 2001: Odissea nello spazio*, tanto per citare le opere precedenti dei due «padri» *di A.I.* Qualcun altro ha ricordato *Blade Runner* e *Matrix*, altri film in cui robot e cervelloni - chissà perché quasi sempre malvagi, nell'immaginazione degli autori - arrivano a competere con l'uomo per la supremazia su questo straccio di pianeta.

E se i recensori a stelle e strisce non hanno risparmiato critiche al film di Spielberg, ancora più scettici sono gli addetti ai lavori. «Fosse vero, avremmo risolto tutti i nostri problemi. Il fatto è che quello del film è davvero un ragazzino... - scuote la testa Giorgio Metta - Prima che un robot arrivi a tanto dovrà passarne di acqua sotto i ponti...» Trentenne, dottore di ricerca in ingegneria all'Università di Genova, Giorgio è post-doctoral associate nel laboratorio di Intelligenza artificiale del Massachusetts Institute of Technology di Cambridge.

Insomma, gli androidi di Spielberg non sono convincenti. E forse è anche per quello che la storia di A.I. è stata ambientata in un futuro remoto.

L'alba dell'intelligenza artificiale

Era il 1950 quando Alan Mathison Turing, allora vice direttore del laboratorio di calcolo all'Università di Manchester, pubblicava sulla rivista «Mind» il celebre test che dovrebbe permettere di stabilire se una macchina sia o meno intelligente. In sintesi, l'automa supererebbe la prova se, alla fine di una «conversazione» a tre con un giudice e un essere umano, il giudice si dimostrasse incapace di distinguere le risposte della macchina da quelle della persona. Niente male, per un'epoca in cui i computer funzionavano a schede perforate. Ma oggi gli esperti di AI concordano sull'ingenuità di quella proposta. «Il difetto principale del test di Turing è di essere incentrato sulla nostra specie» commenta Kenneth Ford, ex direttore dell'Institute for Human and Machine Cognition della University of West Florida. Il traguardo scientifico dell'Intelligenza artificiale, ai tempi nostri, dovrebbe piuttosto essere quello di fornire una spiegazione algoritmica dell'intelligenza, o meglio delle capacità mentali in quanto tali.

In linea, tutto sommato, con la definizione di Intelligenza artificiale emersa da due lunghi mesi di congresso - la Dartmouth Conference, così battezzata perché fu organizzata dal Dartmouth College - di pionieri della materia. Era l'estate del 1956, quando i padri dell'informatica si riunivano tra i verdi boschi del Vermont per concludere: «Ogni aspetto dell'apprendimento, o qualsiasi altra caratteristica dell'intelligenza, può essere descritto - in linea di principio - in modo così preciso da costruire una macchina in grado di simularlo». E il MIT fu uno dei primi centri di ricerca ad accogliere la sfida.

Nel 1959 Marvin Minsky, che in precedenza aveva costruito la prima rete neurale, e John McCarthy, inventore del linguaggio di programmazione LISP e promotore della Dartmouth Conference, fondarono l'AI Laboratory, con l'ambizioso obiettivo di comprendere il funzionamento della mente umana e di costruire macchine intelligenti. E con la discreta dote di qualche milione di dollari (dell'epoca...) gentilmente elargita dalle casse dell'esercito. Mancavano vent'anni perché il personal computer vedesse la luce... E, a posteriori, anche l'entusiasmo dello US Army era precoce, anche se giustificato dai timori della guerra fredda e dalla conseguente pioggia di quattrini che ogni Amministrazione scatenava sulla ricerca.

IN PILLOLE

- Il film di Steven Spielberg *A. I.*, accolto con scarso favore dalla critica sia negli Stati Uniti sia a Venezia, riporta alla ribalta il sogno dell'Intelligenza artificiale di costruire robot capaci di intelligenza e sentimenti come gli esseri umani.
- A cinquant'anni dalla formulazione del famoso test di Turing, sia il software sia i robot hanno compiuto enormi progressi. Si trovano programmi di Intelligenza artificiale in molte applicazioni quotidiane, e nei laboratori di ricerca sono in fase di sviluppo prototipi di robot «umanoidi» capaci di prestazioni eccezionali.
- Anche in termini di ritorno commerciale la robotica intelligente sta cominciando a essere un business di rilievo. A parte il noto successo del cane Aibo della Sony, sono ormai numerosissime le aziende che offrono «giochi» robotici.
- Ma allora perché il film di Spielberg è ancora fantascienza? Le applicazioni di AI di oggi sono ancora molto specializzate e immature. Occorreranno decenni prima che possano arrivare alla complessità dell'intelligenza umana. E anche così...

AI Laboratory, MIT

TROODY, IL DINOSAURO sviluppato al Leg Laboratory del MIT. È in grado di muoversi autonomamente camminando su due zampe, sebbene i suoi passi siano un po' incerti. Nelle pagine precedenti, il logo e una scena del film di Steven Spielberg *A.I.*

PINO, IL ROBOT UMANOIDE SVILUPPATO DA HIROAKI KITANO e collaboratori per la partecipazione alla Robocup, il campionato di calcio dedicato ai robot. Pino è stato presentato nel 2000 alla Biennale di Venezia e quest'anno è stato esposto al MOMA di New York.

cortesia Kitano Symbiotic Systems Project

Poi, via via che venivano a galla i problemi, gli ambienti militari si sono disinteressati all'Intelligenza artificiale, nonostante i significativi progressi del settore. Sono degli anni settanta i primi tentativi di costruire macchine capaci di apprendimento. Come Automated Mathematician, un programma sviluppato da Douglas Lenat per riscoprire da solo - sulla base di un ristretto numero di regole - i teoremi della teoria dei numeri. Sebbene si sia arenato dopo i primi, brillanti successi, AM resta il primo abbozzo di software «intelligente», almeno se si ammette che un bravo matematico appartenga alla categoria.

Negli anni ottanta, sebbene gli studi di Intelligenza artificiale abbiano ormai applicazioni considerevoli - come il sistema a *fuzzy logic* utilizzato per guidare la metropolitana automatizzata di Sendai, in Giappone - gli *spin off* commerciali ammontano a pochi milioni di dollari, un magro compenso per investimenti che erano stati fin troppo generosi. Solo più tardi i sistemi vocali e di riconoscimento del linguaggio cominciano ad avere un apprezzabile grado di affidabilità e un vocabolario accettabile, e le tecniche di intelligenza artificiale trovano applicazioni in combinazione con il software ordinario.

Oggi, le applicazioni dell'AI sono numerose, ma tra le macchine dotate di sistemi intelligenti ce ne sono di quanto mai insolite. A parte i sistemi di riconoscimento vocale, o i software per il riconoscimento di forme, ci sono lavatrici che selezionano il programma in funzione della biancheria, sistemi automatici di insegnamento (sulla cui efficacia ci permettiamo di nutrire qualche dubbio), sistemi decisionali di investimento, filtri della posta elettronica e via dicendo.

E la macchina a immagine e somiglianza dell'uomo? Il robot umanoide, per fortuna o per disdetta, è ancora abbastanza lontano. Ma c'è chi giura che prima o poi le macchine saranno come noi. E ci aiuteranno a capire come funziona la nostra mente.

Costruire un robot intelligente

«La ricetta per costruire un robot "come" David è fatta di molti ingredienti» suggerisce Hiroaki Kitano, responsabile del Computer Science Laboratory della Sony e organizzatore della Robocup, il campionato del mondo di calcio per robot che negli ultimi anni ha riscosso un clamoroso successo di pubblico e una partecipazione sempre più folta. L'anno scorso, con il suo Kitano Symbiotic Systems Project, ha presentato Pino, un robot alto mezzo metro e dotato di un sistema di circuiti neurali che vorrebbe imitare il comportamento umano. E la creatura è finita sotto la luce dei riflettori di istituzioni prestigiose come la Biennale di Venezia e il MOMA di New York. Messo a punto per la partecipazione alla Robocup, Pino - un diminutivo di Pinocchio - sembra più Neil Armstrong in abiti da lavoro che un comune bipede, ma proprio qui sta uno dei problemi centrali di quella miscela tra robotica e intelligenza artificiale che dovrebbe dare vita a un robot umanoide.

Per rimediare qualcosa che somigli, sia pur vagamente, a un essere umano, occorrono almeno cinque elementi: una carrozzeria (il corpo), un hardware (il cervello), un insieme di organi di senso, un sistema di trasmissione (il sistema nervoso) e, dulcis in fundo, un software che riceva messaggi, coordini le funzioni, impartisca ordini rapidi e precisi e controlli l'intero apparato (l'intelligenza).

Compiti apparentemente semplici, come l'andatura bipede, hanno richiesto all'evoluzione milioni di anni, prima di essere messi a punto a dovere (ammesso che lo siano). E il povero Pino, nonostante la buona volontà, non ha certo la disinvoltura di una ballerina. Al Leg Laboratory del MIT lavorano da decenni a robot in grado di camminare autonomamente, ma anche lì i risultati non sono ancora ottimali. Dopo una dozzina di prototipi dall'aspetto di formica, fenicottero, dinosauro (Troody, che pre-

cortesia Kitano Symbiotic Systems Project

Ma sono solo giocattoli?

Ebbene, sono anni, se non decenni, che aspettiamo impazienti le macchine intelligenti. Quelle che ci accompagneranno nella vita quotidiana, insomma i robot da compagnia, per grandi e piccini. Che da una parte siano in grado di prestare assistenza a chi ne ha bisogno e dall'altra tengano occupati i ragazzini sempre più esigenti dei nostri tempi. Fino a ieri, però, era buio pesto. Oggi, invece, se c'è un mercato che minaccia di esplodere da un momento all'altro è quello dei robot da intrattenimento.

Del successo commerciale di Aibo, il cane robotico della Sony, venduto ormai in 50 000 esemplari nonostante il prezzo al dettaglio non sia proprio alla portata di tutti, abbiamo già parlato (si veda la rubrica *Le scommesse dell'Hi-Tech* in «Le Scienze» n. 396, agosto 2001), ma è fresca la notizia che la casa giapponese ha appena annunciato il lancio di Latte e Macaron, due «cugini» di Aibo. Le novità: occhi languidi da cane e un rivestimento in morbida plastica che li fanno somigliare di più a un vero cucciolo da compagnia. Il prezzo: intorno a 1 700 000 lire. Latte e Macaron si possono prenotare in rete dal 1° ottobre all'indirizzo www.aibo.com/lm/main_e.html.

Ma il panorama dei «giochi» robotici si fa ogni giorno più ricco. E deve essere pure redditizio, se anche un intramontabile colosso come la Lego si è lanciato in questo business. È del Natale 1999, infatti, l'uscita del Lego Mindstorm Robotic Invention System, un kit di mattoncini equipaggiati con un microcomputer, due servomotori e tre sensori (due tattili e un fotosensore), oltre a un software per programmare i movimenti del robot. Nella versione di base, il set costa più o meno 400 000 lire, ma volendo si può integrare con set aggiuntivi come una microtelecamera o un telecomando per il controllo a distanza.

Anche la tecnologia sviluppata al MIT ha cominciato a dare i suoi frutti in termini di fatturato. Dopo aver realizzato robot di varia natura su commissione dello US Army, iRobot - la società fondata da Rodney Brooks, direttore dell'AI Lab - ha prodotto My Real Doll, commercializzata da una grande azienda di giocattoli statunitense. «Ha sensori su tutto il corpo, anche sotto i piedi» illustra fiera Helen Greiner, collaboratrice di Brooks e presidente di iRobot, mentre tiene in braccio un involto che ha tutta l'aria di una bambola. «E reagisce agli stimoli. Si addormenta se la lasciate sdraiata. Ha un biberon per quando ha fame.» A vederla c'è quasi da aspettarsi che da un momento all'altro faccia pipì...

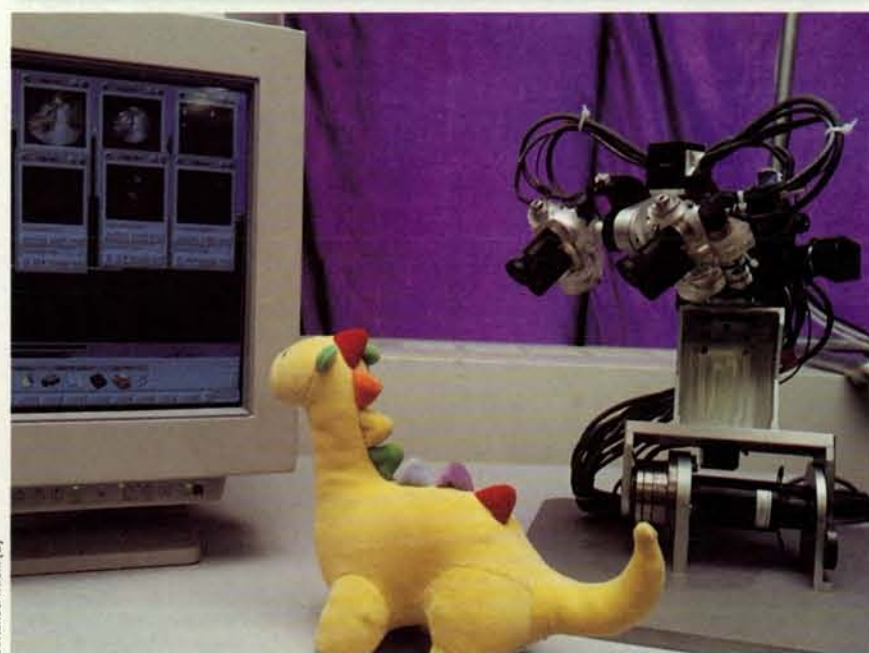
Di My Real Doll, negli States, ce ne sono in circolazione oltre 100 000, ormai, grazie anche a un prezzo abbordabile (intorno ai 100 dollari). «Ma il bello deve ancora venire» prosegue la Greiner, 34 anni e una carriera da *American dream*. «In autunno metteremo in commercio sul mercato americano un dinosauro robotico. Vuoi vedere una dimostrazione?» Ancora «nudo», con le sue spoglie meccaniche in bella vista, il prototipo comincia a passeggiare per l'ufficio, evita gli ostacoli e, colto da un raptus giurassico, mi azzanna un polpaccio (i denti, per fortuna, sono di gomma...). Non appena Helen gli allunga un ceffone sulla nuca, la bestiola si produce in una specie di muggito e si strofina contro la sua gamba a caccia di coccole. Per la miseria di un centinaio di dollari, i nostri bambini tecnologici potranno avere questo figlio illegittimo di *Jurassic Park* e *A.I.*

Ma non è finita qui. Più o meno nello stesso periodo iRobot lancerà gli Avatar, maggiordomi robotici controllati a distanza. Collegati a Internet dall'ufficio, o da qualunque altro posto, si potrà muovere il robot per le stanze, anche su e giù per le scale. «Sono concepiti per facilitare le cose ai grandi manager» dilaga la Greiner. «Saranno utili in videoconferenza, quando uno ha bisogno di spostarsi per altri impegni. O per comunicare con i collaboratori. Ma potrebbero anche servire per dare un'occhiata a come vanno le cose in casa, quando si lasciano soli bambini o anziani. Per il momento, non abbiamo ancora fissato un prezzo.» Ma intanto, se proprio non riuscite a farne a meno, si può prenotarlo in rete all'indirizzo www.irobot.com...

cortesia Sony

Cattaneo/Trifoni

HELEN GREINER, PRESIDENTE DI I-ROBOT, con My Real Doll (*sotto*), la bambola dotata di sensori. Qui sopra, Avatar, il «vigilante» robotico destinato alle aziende, ma anche al mercato casalingo. A destra, il cane Aibo, successo commerciale della Sony.

Cattaneo/Trifoni (2)

LASZLO, UNA DELLE «CREATURE» DELL'AI LABORATORY DEL MIT, sembra particolarmente interessato al piccolo dinosauro di pezza. Quando si sposta il giocattolo, anche rapidamente, il robot ne segue i movimenti con lo sguardo. Qui a fianco, un braccio robotico realizzato nel laboratorio diretto da Rodney Brooks e oggi esposto al Museo del MIT.

sto farà la sua comparsa in versione commerciale (*si veda il box qui sopra*), è finalmente nato M2, un robot in grado di camminare imitando i movimenti del ginocchio e dell'anca. Ma ancora non ci siamo. Gli arti umani sono dotati di una flessibilità incompatibile con i materiali metallici di cui sono costituiti i robot di oggi. Per questo al laboratorio di biomeccatronica del MIT già pensano di passare oltre: l'obiettivo è di ottenere muscoli artificiali, costituiti da un idrogel polimerico, che riflettano l'elasticità di quelli umani e siano alimentati a glucosio. Alla Washington University, invece, la ricerca di Glenn Klute e colleghi punta all'uso di attuatori pneumatici, che hanno dimostrato proprietà molto simili a quelli dei muscoli.

Se il movimento è cosa complessa, gli organi di senso non sono da meno. Mentre sventola giocattolini per l'infanzia sotto gli occhi di Laszlo - un'evoluzione del famoso Cog, il robot intelligente che all'inizio degli anni novanta aveva scatenato speranze e illazioni - Giorgio Metta controlla le reazioni del robot su un monitor, azzardando una spiegazione. «Qui all'AI Lab sto perfezionando i meccanismi di visione di Laszlo.» E qui viene il difficile. Perché Laszlo «veda», occorre imitare le caratteristiche dell'occhio umano. E la natura ha fatto sì che la visione binoculare privilegiasse quello che abbiamo dritto davanti agli occhi, lasciando un po' più sfuocati i contorni dell'immagine. Così il software che regola la visione di Laszlo, e quindi controlla i meccanismi di attenzione del robot, deve fare in modo che la sua vista sia migliore al centro e più sfuocata ai bordi, come la nostra. Per controllare i movimenti di Laszlo in relazione a quello che vede, però, occorrono i processori di 22 personal computer. E, come se non ba-

@

→ **www.ai.mit.edu**
All'indirizzo dell'AI Laboratory si possono trovare ulteriori informazioni sui robot di Brooks e colleghi, e sulla ricerca che ha portato ai risultati di oggi.

→ **www.symbio.jst.go.jp**
Al Kitano Symbiotic Systems Project è possibile vedere un filmato in mpeg del robot umanoide Pino.

→ **mindstorms.lego.com**
Sito della divisione robotica della Lego, dove si possono trovare informazioni sul Robotic Invention System.

KISMET, IL ROBOT SOCIALE progettato da Cynthia Breazeal, è in grado di rispondere agli stimoli con espressioni facciali che riproducono quelle umane.

Cattaneo/Trifoni

stasse, la sua fragile capacità di osservare il mondo che lo circonda è finemente tarata sulla luminosità del laboratorio. Come dire: fuori di lì, per le strade di Boston, Laszlo è cieco.

Tornando ai cinque ingredienti della ricetta per costruire un «uomo artificiale», è evidente che il test di Turing non è prossimo a essere superato. Se il sistema di trasmissione dei robot attuali può essere considerato abbastanza efficiente, tutti gli altri elementi sono ancora in una fase piuttosto precoce: la carrozzeria è scadente; gli organi di senso sono imprecisi e mancano di duttilità; ci sono software in grado di apprendere e dotati di un certo grado di autonomia decisionale, ma nessuno di complessità paragonabile al «programma» che gestisce un centro di elaborazione come il cervello; e infine l'hardware è ancora immaturo.

Secondo Ray Kurzweil, presidente della Kurzweil Technologies e detentore di numerosi primati in fatto di macchine che apprendono, è solo questione di tempo. «In appena cinquant'anni la capacità di calcolo di un computer è cresciuta in misura spaventosa. Se continua di questo passo, non più tardi del 2020 un personal computer avrà la capacità di elaborazione di un cervello umano. E in altri dieci anni si avrà una padronanza quasi completa del software dell'intelligenza.»

Emozione e pensiero

La prospettiva è inquietante ma qualcuno sostiene che l'Intelligenza artificiale è già una realtà tangibile. Il punto è che ci rifiutiamo di riconoscerla. In fondo fino a mezzo secolo fa il «calcolatore» non era altro che una persona particolarmente dotata nel far di calcolo. Da quando la Texas Instruments ha spodestato il calcolatore umano, sembra quasi che l'abilità nel calcolo matematico non sia più un indizio di intelligenza. «Spesso si afferma – rincara la dose Kenneth Ford – che Deep Blue, il computer che ha battuto Garry Kasparov in una sfida a scacchi, non sia *veramente* intelligente.» Il punto è che Deep Blue, programmato con le regole del gioco, ha imparato via via mosse e strategie fino a battere il campione del mondo. E non è poco. Ma è altrettanto vero, si dirà, che Deep Blue non si è commosso ringraziando i suoi tifosi. Non ha esultato lanciando magliette sugli spalti. Non ha mandato saluti ai familiari. Deep Blue, per gli scettici, è un «programma», né più né meno come quelli che gestiscono la contabilità.

Eppure c'è chi sta insegnando ai robot il linguaggio delle emozioni. Vicino di «banco» di Giorgio Metta, Paul Fitzpatrick - un giovanotto irlandese in calzoni corti e maglietta - verifica sul monitor di un computer i desideri di Kismet, costruito da Cynthia Breazeal, una delle collaboratrici di Robert Brooks, direttore dell'AI Lab. «Kismet è progettato - commenta Paul - per studiare i sentimenti e le emozioni, ed è in grado di rispondere agli stimoli visivi con espressioni facciali che riproducono quelle umane.» E, mentre si dilunga in spiegazioni, muove un oggetto sotto gli occhi di Kismet, che ne segue le evoluzioni con uno sguardo deliziato. A vederlo dalla nostra prospettiva, Kismet sembra genuinamente curioso. Nel senso che quando segue le evoluzioni degli oggetti assume un'espressione interrogativa. Gli indicatori sullo schermo misurano le sue reazioni in termini di attributi squisitamente umani: gioia, fame, dolore, paura...

Improvvisamente il giovane ricercatore batte le mani sotto gli occhi del robot, che inarca le sopracciglia e torce le labbra di plastica in una smorfia di terrore. «Ecco, gli ho fatto paura.» E, dopo un'altra occhiata al monitor: «Adesso ha di nuovo voglia di giocare...». È inquietante l'idea che un ammasso di cavi, bulloni e ferraglia, con gli occhi teneri che nascondono due telecamere, possa provare sentimenti umani. O perlomeno, per non esagerare, è impressionante che riesca a manifestare espressioni che corrispondono alle nostre emozioni.

Pensate un po' a un Deep Blue con la faccia di Kismet, che esulti per la fresca vittoria, e - in un certo senso - il gioco è fatto. O no? Certo sono molti i tasselli che mancano ancora all'appello per avere un robot umanoide indistinguibile da una persona reale, soprattutto se si continua a considerare il test di Turing come traguardo della ricerca, o se si guarda come modello al piccolo David di Spielberg. Ma un futuro di robot in grado di muoversi autonomamente con una certa agilità e di prendere decisioni in base a regole di comportamento più o meno generali non è più oggetto di pura fantascienza. Se poi questi aspetti siano da considerare manifestazioni di intelligenza - o piuttosto applicazioni di quella umana - è materia di giudizio individuale e, probabilmente, dipende dalle convinzioni personali sulla centralità dell'intelligenza umana e sulla possibilità che ciò che abbiamo per millenni considerato frutto della «creatività» sia o meno riducibile a un insieme di algoritmi, per quanto complesso.

CAMPI ELETTROMAGNETICI

un rischio per la salute?

Un'analisi dello stato delle conoscenze per verificare quali sono le certezze, i dubbi e gli ulteriori indirizzi della ricerca scientifica

di Claudio Minoia, Martino Grandolfo, Pietro Comba, Paolo Rossi e Fabrizio Oleari

Digital Vision

Di tutti i problemi che possono sollevare gli impianti e le apparecchiature che producono attorno a sé campi elettromagnetici - da quelli tecnologici a quelli ambientali, paesaggistici, giuridici e via discorrendo - sono sicuramente gli eventuali rischi sanitari quelli che hanno suscitato il massimo interesse. E non solo da parte del più vasto pubblico. Negli ultimi anni sono state avviate numerose ricerche, *in vivo* e *in vitro*, e studi epidemiologici sugli animali e sull'uomo, con lo scopo di evidenziare i possibili pericoli connessi alle esposizioni a campi elettromagnetici. Particolare attenzione è stata dedicata ai campi a frequenze estremamente basse (ELF), alle radiofrequenze (RF) e alle microonde (MW), alla cui esposizione può essere interessata tutta la popolazione. Senza però trascurare il fatto che molte attività lavorative possono comportare esposizioni a questi campi, e di gran lunga più intense di quelle riscontrabili nell'ambiente in generale. Le indagini effettuate hanno spesso fornito risultati contraddittori, come è prevedibile attendersi quando gli obiettivi e i metodi sono eterogenei. L'impossibilità di arrivare a una puntuale definizione del rischio espositivo, in particolare per quanto riguarda i possibili effetti cancerogeni, ha contribuito a suscitare nell'opinione pubblica un allarme generalizzato nei confronti del quale la comunità scientifica è attivamente impegnata.

Gli studi sulle frequenze estremamente basse hanno preso in esame i possibili effetti su vari organi e sistemi animali - dal sistema endocrino a quello nervoso, a quello cardiovascolare - rilevando variazioni rispetto alla norma, il cui significato eziopatologico appare però piuttosto incerto.

Le ricerche *in vitro* hanno valutato l'azione citotossica, la fagocitosi e la capacità delle cellule del sistema immunitario a dividersi e a differenziarsi. Va rilevato che non sono mai stati dimostrati, come risultato di una mutazione, cambiamenti fenotipici nella struttura della cellula. Inoltre, dai dati sperimentali finora ottenuti emerge che i campi elettrici e magnetici a 50/60 hertz non possono essere considerati agenti iniziatori del processo di cancerogenesi a livello cellulare. Né si hanno dati a sostegno di un ruolo dei campi magnetici nello sviluppo della leucemia. Quattro esperimenti protratti per l'intera vita degli animali da laboratorio, anche a livelli di esposizione di 2000 microtesla, hanno permesso di escludere che i campi magnetici siano coinvolti nello sviluppo di tumori linfopoietici. Anche gli studi condotti sui roditori per evidenziare un effetto di promozione nei confronti di leucemie o linfomi sono risultati costantemente negativi. Si può quindi ritenere, allo stato attuale, che nessun risultato di laboratorio riproducibile riesca a dimostrare effetti biologici dei campi magnetici ELF a livelli inferiori a 100 microtesla.

Un'ulteriore conferma deriva da una recente rassegna, pubblicata nel 2000, della parte di studi del Progetto RAPID (Progetto di ricerca sui campi elettromagnetici e di diffusione dell'informazione al pubblico del Governo degli Stati Uniti) relativa all'incidenza di leucemie e linfomi in roditori esposti a campi magnetici a bassa frequenza. Il documento conclude che «i risultati combinati degli esperimenti su animali sono pressoché uniformemente negativi per quanto riguarda un aumento delle leucemie e indeboliscono la possibile associazione tra l'esposizione a campi elettromagnetici e la leucemia nell'uomo, come suggerito dai dati epidemiologici».

In una successiva rassegna relativa a studi sul tumore mammario, gli stessi autori sono pervenuti alla conclusione che «la totalità dei dati sui roditori non conforta l'ipotesi che l'esposizione a campi magnetici a frequenza industriale aumenti il tumore nei roditori stessi, né fornisce sostegno sperimentale a possibili associazioni epidemiologiche tra l'esposizione a campi magnetici e un aumento di tumori della mammella».

Gli studi epidemiologici

Il primo studio epidemiologico che abbia messo in relazione l'esposizione residenziale ai campi magnetici alla frequenza di rete con un eccesso di rischio di tumori in età pediatrica fu condotto nel 1979 da Nancy Wertheimer ed Ed Leeper, dell'Università del Colorado a Boulder. Essi evidenziarono un eccesso di rischio per i bambini residenti in prossimità di linee elettriche definite «ad alta configurazione di corrente». In seguito, sui tumori infantili sono state condotte 31 indagini epidemiologiche e, di queste, 26 erano relative alla leucemia infantile. Come spesso avviene, però, i risultati non sono stati univoci, in quanto le metodologie, i parametri presi in esame e l'assortimento dei campioni non erano uniformi. Inoltre, va tenuto presente che nelle indagini epidemiologiche - che non si svolgono in un laboratorio in cui le condizioni al contorno sono tutte rigorosamente controllate - esiste il grande problema dei «fattori di confondimento», ovvero della possibile presenza di altri elementi che, pur potendo influire sul fenomeno in esame, non sono stati presi in considerazione o volutamente o perché non noti al momento dell'indagine.

Per questo, al fine di giungere a un risultato più preciso e uniforme, nel corso dell'ultimo decennio sono state pubblicate numerose rassegne di studi epidemiologici sulla leucemia infantile condotte anche effettuando meta-analisi, cioè analisi quantitative dei risultati di studi omogenei. Una meta-analisi condotta nel 1993 da Anders Ahlbom e collaboratori, del Karolinska Institutet di Stoccolma, su ricerche svolte in Danimarca, Svezia e Finlandia, che presentavano una particolare omogeneità nei metodi di selezione dei soggetti in studio e nella valutazione dell'esposizione, ha indicato un rischio relativo di 2,1 (con un intervallo di confidenza al 95 per cento compreso tra 1,1 e 4,1), a significare un raddoppio del rischio per esposizioni superiori a 0,2 microtesla.

Per contro, da una meta-analisi di 11 studi sulla leucemia infantile in relazione all'esposizione residenziale a 50/60 hertz condotta nel 1997 dal National Research Council degli Stati Uniti, l'eccesso di rischio in corrispondenza di livelli di esposizione superiori a 0,2 microtesla si riduceva al 50 per cento.

Se si amplia il quadro - come hanno per esempio fatto Susanna Lagorio, dell'Istituto superiore di Sanità e Alberto Salvan, del Ladseb-CNR di Padova, in una aggiornata e approfondita revisione della letteratura in proposito - si constata che nel complesso questi studi continuano a offrire valori di rischio differenti relativamente all'associazione tra esposizione a campi magnetici a 50/60 hertz e leucemia infantile, rendendo problematico un nesso causale fra i due fenomeni.

Un'altra procedura atta a valutare il rischio espositivo consiste nell'impiego delle cosiddette analisi *pooled*, effettuate aggregando i dati originali dei singoli studi, e non i soli risultati, come avviene nelle meta-analisi. Utilizzando i dati di nove studi pubblicati tra il 1993 e il 1999, Ahlbom e collaboratori hanno determinato stime di rischio vicine al valore «nessun effetto» per 3203 casi di leucemia infantile e 10 138 controlli esposti a induzioni magnetiche stimate inferiori a 0,4 microtesla. Per 44 casi di leucemia e 62 controlli esposti a valori superiori a 0,4 microtesla il rischio relativo era invece pari a 2,00 (raddoppio dell'incidenza),

AP Photo/Gregorio Borgia

LA STAZIONE EMITTENTE di Santa Maria di Galeria, dalla quale viene trasmessa in tutto il mondo la voce di Radio Vaticana, è stata recentemente al centro di numerose polemiche. Sotto, una tabella riassuntiva relativa allo spettro di frequenze delle principali sorgenti di campi elettromagnetici non ionizzanti.

Hz				
3×10^{15}	RADIAZIONI IONIZZANTI			
3×10^{14}	RADIAZIONI NON IONIZZANTI	UV		STERILIZZAZIONE
		VISIBILE		LASER, LAMPADE
		INFRAROSSO		SORGENTI TERMICHE, TELECOMANDI
3×10^{11}		RADIOFREQUENZE	MICROONDE	IMPIANTI RADAR, RADARTERAPIA, TELEFONIA CELLULARE, FORNI A MICROONDE, PONTI RADIO
3×10^{8}				EMISSIONI RADIOTELEVISIVE, MARCONITERAPIA, RADIOAMATORI, SALDATURA E INCOLLAGGIO, RISCALDAMENTO A INDUZIONE
3×10^{4}		BASSE FREQUENZE		METAL DETECTOR, VIDEOTERMINALI, MAGNETOTERAPIA, ELETTRODOMESTICI, LINEE ELETTRICHE, LINEE TELEFONICHE
3×10^{1}				
0		CAMPI STATICI		RISONANZA MAGNETICA, ELETTROLISI

IN PILLOLE

- È importante distinguere fra sorgenti che generano campi a frequenze estremamente basse (ELF) e sorgenti di radiofrequenze (RF) e microonde (MW).
- Nessun esperimento di laboratorio ha potuto mettere in evidenza l'esistenza di un nesso causale fra esposizione a campi ELF e insorgenza di tumori.
- È stata rilevata una correlazione statistica, ma non un nesso causale, fra esposizione a campi magnetici ELF > a 0,4 μT e aumento del rischio di insorgenza di leucemia in popolazioni infantili. Tale rischio non sussiste per esposizioni < 0,4 μT.
- L'esposizione a RF e MW non pare correlata all'aumento di rischi sanitari a lungo termine, pur richiedendo ulteriori ricerche.

Le esposizioni professionali

Il problema delle esposizioni professionali merita un approccio specifico. Nel caso delle più comuni sorgenti ambientali, i tipici livelli di esposizione non sono così elevati da comportare misure di protezione da effetti acuti. In molte delle esposizioni professionali la protezione dagli effetti acuti rappresenta invece un'esigenza irrinunciabile, protezione da modulare a seconda delle particolari condizioni di esposizione e tipologie di sorgente.

Sono infatti numerose le attività lavorative che possono comportare esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici, a livelli elevati.

Gli addetti a processi di elettrolisi - come nella preparazione dell'alluminio, o nella produzione di grandi elettrodi per archi voltaici - possono risultare esposti a campi magnetici statici: per quanto i tipici livelli di esposizione in applicazioni industriali o di ricerca non siano correlabili con effetti diretti sull'organismo, essi possono comportare interferenze con gli stimolatori cardiaci e potenziali rischi per i portatori di protesi metalliche.

Nel caso dei campi magnetici ELF, l'esposizione degli addetti alle centrali elettriche viene stimata attorno a poche decine di microtesla, come valore medio, con picchi più elevati specie per gli addetti alla manutenzione delle linee. Anche la necessità di distribuire l'energia all'interno degli impianti industriali può comportare una vicinanza non intenzionale tra alcune postazioni di lavoro e i cablaggi, con inattesi livelli elevati di induzione magnetica. Nei forni elettrici e nelle fonderie i lavoratori possono essere esposti a campi magnetici fino a qualche millitesla, con picchi più elevati nel caso degli addetti ai processi di saldatura. Esposizioni significative, dell'ordine delle centinaia di microtesla, sono riscontrabili anche nei processi di smerigliatura a mano e nella produzione di magneti permanenti.

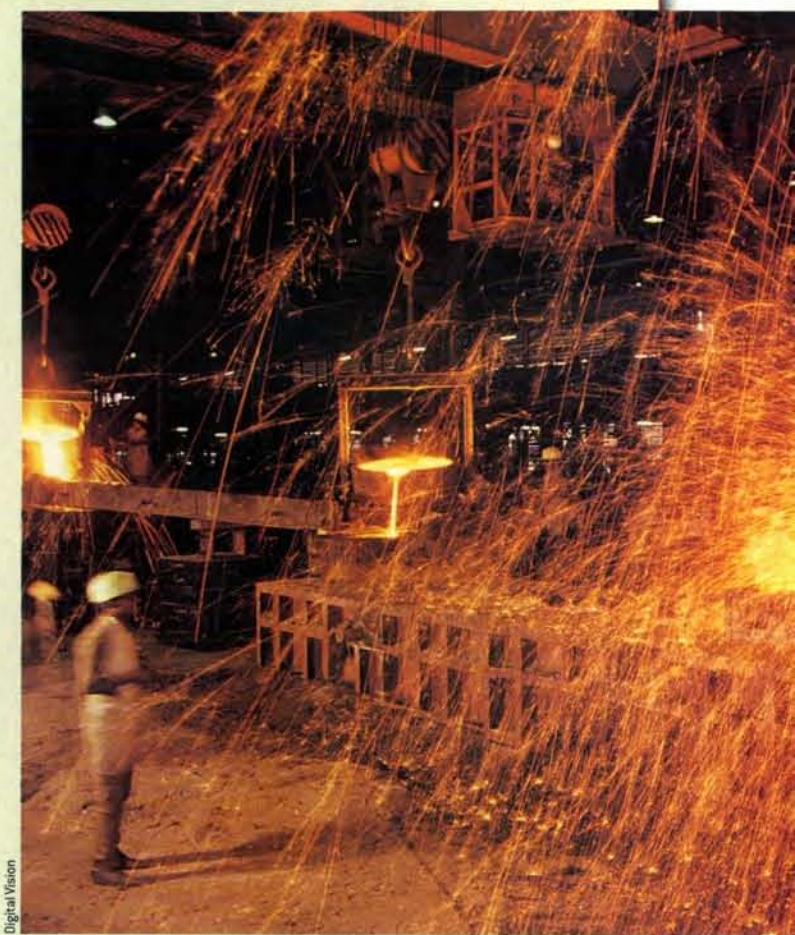
Per quel che riguarda le applicazioni a radiofrequenze e microonde, si stima che in Italia il numero di riscaldatori industriali in attività sia superiore alla decina di migliaia. Gli apparecchi per riscaldamento a perdite dielettriche - impiegati nella lavorazione del legno, per la saldatura e stampaggio di manufatti in plastica e PVC, e nell'industria tessile per l'essiccamento delle fibre - producono calore all'interno del materiale trattato. Le potenze utilizzate possono arrivare fino alle decine di chilowatt, con frequenze d'uso variabili tra qualche megahertz e il centinaio di megahertz. I livelli di esposizione per gli operatori possono così raggiungere il migliaio di volt al metro e dipendono in modo critico dalle condizioni operative della macchina e dall'ambiente di utilizzo. Indagini condotte nel settore del legno hanno evidenziato come l'attuazione di semplici interventi di bonifica e contenimento, e l'adozione delle corrette procedure di impiego e installazione possano portare a significative riduzioni delle esposizioni.

Gli apparecchi per riscaldamento a induzione - utilizzati nel trattamento dei materiali metallici, come saldatura, indurimento, tempera, o fusione, e nell'industria elettronica - sfruttano intensi campi magnetici per produrre calore all'interno di metalli e semiconduttori. Le potenze di esercizio possono raggiungere le migliaia di chilowatt per grossi impianti di saldatura di tubi, e le frequenze d'uso variano da qualche decina di chilohertz sino a poche decine di megahertz. In assenza delle opportune misure di protezione e contenimento, i livelli di esposizione possono toccare la decina di ampere al metro per il campo magnetico e il migliaio di volt al metro per il campo elettrico.

In campo sanitario, le macchine per diatermia possono costituire significative sorgenti di campi elettromagnetici all'interno delle strutture che le ospitano. Le apparecchiature di marconiterapia operano alla frequenza di 27,12 MHz e le potenze applicate al paziente raramente superano i 200 W. Gli apparati di radarterapia lavorano alla frequenza di 2,45 GHz (la stessa dei forni a microonde di uso domestico) e le potenze applicate al paziente sono in genere limitate al centinaio di watt. L'entità e la geometria dei campi emessi dipendono dalla configurazione degli applicatori e dalla potenza impostata, ma si possono verificare esposizioni indebite a livelli elevati specie nella fase di accensione degli apparati e posizionamento degli applicatori, in prossimità dei quali l'intensità del campo elettrico raggiunge diverse centinaia di volt al metro. Semplici interventi di riorganizzazione e sistemazione, insieme con l'adozione delle corrette procedure operative e di installazione, consentono sovente di ridurre a livelli accettabili le esposizioni non desiderate.

Anche nel settore delle telecomunicazioni diversi tipi di lavoratori possono risultare esposti a livelli elevati di campo, per esempio gli addetti all'installazione e alla manutenzione dei sistemi radianti che devono ascendere sulle torri e i tralicci che li supportano. Nei centri di trasmissione militari, sistemi antenna che impegnano potenze molto elevate possono trovarsi prossimi a strutture che ospitano uffici, o interessare aree accessibili o presidiate.

Lo strumento più completo e scientificamente fondato per garantire la tutela della salute sui luoghi di lavoro è senza dubbio costituito dalle linee guida accreditate a livello internazionale, articolate sul duplice piano di restrizioni alle grandezze «di base» (dosimetriche) e a quelle «di riferimento» (i valori dei campi incidenti), e dall'attenta applicazione delle norme generali di sicurezza sul lavoro.

Digital Vision

NUMEROSI PROCESSI INDUSTRIALI possono essere fonti di esposizione a campi elettromagnetici di intensità elevata.

con un intervallo di confidenza al 95 per cento compreso tra 1,27 e 3,13. Un'ulteriore analisi di questo tipo è stata pubblicata nel 2000 da Sander Greenland e collaboratori del Dipartimento di epidemiologia dell'Università della California a Los Angeles aggregando i dati di 16 studi casi/controllo. Questi autori hanno evidenziato un'associazione statistica tra l'esposizione ai campi magnetici e la leucemia infantile per i bambini esposti a valori superiori a 0,3 microtesla, con un rischio relativo combinato di 1,68 (incremento dell'incidenza del 68 per cento) e un intervallo di confidenza al 95 per cento compreso tra 1,23 e 2,31.

Per questo, valutando i possibili effetti a lungo termine associati all'esposizione a campi ELF, il National Institute for Environmental Health Sciences, (NIEHS) degli Stati Uniti - rifacendosi ai criteri dell'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC) dell'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS) - ha concluso che sono emerse «limitate evidenze» di cancerogenicità per la leucemia infantile, in relazione all'esposizione residenziale a campi ELF, e per la leucemia linfatica cronica, in relazione alle esposizioni professionali. Con il termine «limitata evidenza» si vuole significare che un nesso causale è credibile, ma non può essere escluso il ruolo della variabilità casuale, di spiegazioni alternative e di errori sistematici. Su questa base il NIEHS ha classificato i campi ELF solo come «possibili cancerogeni».

Nel marzo 2000 è stato pubblicato un documento del National Radiological Protection Board (NRPB) britannico, nel quale vengono esposte le conclusioni di un gruppo di lavoro presieduto da Sir Richard Doll, professore emerito all'Università di Oxford. Secondo questi ricercatori «né gli esperimenti di laboratorio hanno fornito alcuna valida prova che i campi elettrici e magnetici a bassa frequenza siano in grado di produrre il cancro, né gli studi epidemiologici sull'uomo suggeriscono che questi provochino il cancro in generale. C'è tuttavia qualche evidenza epidemiologica che l'esposizione prolungata ad alti livelli di campo magnetico a frequenza industriale sia associata a un rischio di leucemia infantile. In pratica, questi livelli di esposizione si incontrano raramente nel Regno Unito. In assenza di una chiara dimostrazione di un effetto cancerogeno negli adulti, o di una plausibile spiegazione fornita da esperimenti su animali o cellule isolate, l'attuale evidenza epidemiologica non è abbastanza forte da giustificare una netta conclusione che tali campi provochino la leucemia nei bambini. Comunque, a meno che ulteriori ricerche non dimostrino che i risultati sono dovuti al caso o a qualche artefatto al momento non identificato, resta la possibilità che esposizioni intense e prolungate possano aumentare il rischio di leucemia infantile». A commento finale del Rapporto Doll, l'NRPB ha concluso ritenendo che non esistessero evidenze scientifiche aggiuntive tali da richiedere una variazione dei limiti di esposizione suggeriti dall'International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), gli stessi raccomandati a livello comunitario, nel 1999, per la popolazione.

Nel giugno 2001, anche la IARC, in accordo con il NIEHS, ha confermato la classificazione dell'esposizione a campi ELF come «possibile cancerogeno», da intendersi come limitata evidenza di un aumento del rischio di leucemie infantili per esposizioni superiori a 0,4 microtesla. Ha invece escluso tale rischio per i bambini esposti a valori di campo magnetico inferiori, nonché l'associazione tra campi elettrici e magnetici ELF e insorgenza di tumori del cervello o di altri tumori solidi. Per la popolazione adulta, la IARC ritiene che non esistano dati riproducibili che dimostrino un maggior rischio di alcun tipo di tumore legato a esposizioni ambientali e occupazionali a campi elettrici e magnetici a bassa frequenza.

I TELEFONI CELLULARI emettono solo una debole radiazione termica, inferiore alle normali fluttuazioni di temperatura del cervello.

L'esposizione a radiofrequenze e microonde

Sia le radiofrequenze sia le microonde sono in grado di interagire con i tessuti biologici, che assorbono l'energia incidente dissipandola come calore. La diretta conseguenza di questo tipo di radiazione è il riscaldamento del corpo, se l'esposizione è generale, o dei suoi organi, se l'esposizione è localizzata. I possibili effetti sanitari sono quindi effetti termici, e si manifestano solo al di sopra di certi livelli di esposizione e dipendono anche dalla frequenza del campo elettromagnetico. I limiti oggi accettati a livello internazionale, con riferimento all'effetto termico e all'induzione di correnti in grado di influenzare i tessuti eccitabili, sono molto cautelativi, sia per i lavoratori sia per la popolazione generale. Quanto ai possibili effetti a lungo termine legati a un'esposizione cronica, anche in presenza di campi a bassa intensità, le conoscenze attuali non consentono di individuare valori limite (di cui, del resto, deve ancora essere dimostrata la necessità).

Quindi, per quanto riguarda i campi elettromagnetici ad alta frequenza, i dati sperimentali sinora disponibili non hanno evi-

SORGENTI DI CAMPI ELF (50/60 Hz)

SORGENTE	LIVELLI DI ESPOSIZIONE		NOTE
Fondo ELF in aree urbane	1 - 100 V/m;	0,1 μT	permanente
Linee elettriche di trasmissione	1 - 10 kV/m;	1 - 30 μT	al di sotto della linea
Fondo ELF *indoor* (imp. elettrici)	1 - 30 V/m;	~ 0,1 μT	permanente
Elettrodomestici	10 - 250 V/m;	0,01 - 5 mT	a 30 cm di distanza
	50 - 150 V/m;	0,1 - 1 μT	a 30 cm di distanza
Coperte elettriche	250 - 1000 V/m;	1 - 5 μT	-
Televisori	1 - 10 V/m;	0,01 - 0,2 μT	-
Altiforni e fonderie		100 μT - 10 mT	permanente
Videoterminali	1 - 20 V/m;	0,01 - 0,1 μT	posizione operatore

SORGENTI DI MICROONDE E RADIOFREQUENZE

SORGENTE	LIVELLI DI ESPOSIZIONE	NOTE
Fondo urbano per le radiofrequenze	0,1 - 2 V/m	permanente
Trasmettitori radio AM	100 - 400 V/m	a 50 m di distanza
Trasmettitori radio FM	0,1 - 2 V/m	a 1,5 km di distanza
Trasmettitori televisivi UHF	0,1 - 2 V/m	a 1,5 km di distanza
Stazioni radio base GSM	0,1 - 2 V/m	a 50 m di distanza
Stazioni radio base DCS	0,1 - 0,5 V/m	a 50 m di distanza
Radar per il controllo del traffico aereo	10 - 60 V/m	a 100 m di distanza
Trattamento del legno	100 - 150 V/m	a 50 cm di distanza
Telefoni cellulari (900 MHz)	40-100 V/m	a 1-2 cm di distanza
Telefoni cellulari (1,8 GHz)	10- 30 V/m	a 10 cm di distanza
Forni a microonde	< 20 V/m	a 30 cm di distanza

GLI AUTORI

CLAUDIO MINOIA è direttore del Laboratorio di igiene ambientale e tossicologia industriale della Fondazione «S. Maugeri» di Pavia, dove si occupa della valutazione dei rischi presenti in ambienti di vita e di lavoro.
MARTINO GRANDOLFO si occupa presso l'Istituto superiore di Sanità di problemi connessi agli effetti biologici e alla dosimetria delle esposizioni a campi elettromagnetici. È stato direttore del Laboratorio di fisica e vicepresidente dell'ICNIRP.
PIETRO COMBA è ricercatore presso l'Istituto Superiore di Sanità, dove dirige dal 1992 il Reparto di epidemiologia ambientale.
PAOLO ROSSI è ricercatore presso il Laboratorio radiazioni del Dipartimento di igiene del lavoro dell'ISPESL. Si occupa della protezione dalle radiazioni in campo occupazionale, con particolare riferimento alle radiazioni non ionizzanti.
FABRIZIO OLEARI è preposto alla Direzione generale della prevenzione del Ministero della Salute con competenze in materia di ambiente e salute.

Quando 100 tesla fanno bene

AP Photo/Darko Vojinovic

Un manifesto esposto a Belgrado che mostra la nuova banconota da 100 dinari: sulla faccia anteriore riporta il ritratto di Nikola Tesla (1856-1943), lo scienziato e inventore slavo al cui nome è stata intitolata l'unità di misura dell'induzione magnetica. Emigrato nel 1884 negli Stati Uniti, fu collaboratore di T. A. Edison e G. Westinghouse.

GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA

GRANDEZZA	SIMBOLO	UNITÀ DI MISURA	SIMBOLO
Frequenza	f, ν	hertz	Hz
Intensità di campo elettrico	E	volt al metro	V/m
Intensità di campo magnetico	H	ampere al metro	A/m
Induzione magnetica	B	tesla	T
Densità di potenza	S	watt al metro quadrato	W/m^2
Densità di corrente	J	ampere al metro quadrato	A/m^2
Potenza	P	watt (joule al secondo)	W
Tasso di assorbimento specifico	SAR	watt al kg	W/kg
Assorbimento specifico	SA	joule al kg	J/kg

denziato, nel complesso, un'azione mutagena, cancerogena o teratogena, anche se uno studio su topi geneticamente modificati esposti a campi simili a quelli della telefonia cellulare ha evidenziato un aumento di linfomi. A livello cellulare, invece, test sperimentali in condizioni di ipertermia indotta da campi a radiofrequenza non hanno prodotto effetti mutageni.

Nel caso di particolari attività lavorative che sottopongono a questo tipo di esposizioni, alcuni studi hanno rilevato un aumento di tumori, ma questa associazione non è stata confermata da altri studi. Un aspetto rilevante è che nessuno degli studi considerati ha fornito indicazioni quantitative sui livelli espositivi. Anche per quanto riguarda l'incidenza di tumori nei soggetti residenti in prossimità di antenne televisive, gli studi condotti risentono della mancanza di indicazioni quantitative sull'intensità di esposizione e quindi non forniscono conclusioni univoche.

In alcuni studi, tra cui quello recente riguardante la Radio Vaticana, si è osservato un aumento dell'incidenza di tumori in relazione alla vicinanza con le antenne radiotelevisive. Si tratta tuttavia di studi preliminari, che richiedono approfondimenti, tra i quali la valutazione dei fattori confondenti: la distanza, di per sé, non rappresenta infatti un valido indice di esposizione.

Relativamente agli studi epidemiologici condotti sugli utilizzatori di telefoni cellulari, gli unici aumenti di rischio accertati sono quelli relativi a incidenti e decessi associati al loro uso durante la guida. Nella presentazione del Progetto Interphone (uno studio epidemiologico internazionale sull'uso dei telefoni cellulari e l'insorgenza dei tumori del distretto cervico-encefalico) in Italia, Lagorio e collaboratori esaminano il quadro delle conoscenze epidemiologiche in questo settore.

Tra il 1999 e il 2001 sono stati pubblicati tre studi caso-controllo sul rischio di tumori cerebrali in relazione all'uso del cellulare, nessuno dei quali ha evidenziato correlazioni statisticamente significative con l'uso dell'apparecchio. Da rilevare che uno di questi studi, realizzato in Svezia, aveva segnalato un aumento del rischio di tumori nell'emisfero cerebrale omolaterale rispetto all'orecchio utilizzato nelle telefonate, ma l'osservazione non è stata confermata in studi successivi.

Il lavoro più recente si riferisce a una coorte di 420 095 danesi utenti dei servizi di telefonia mobile tra il 1982 e il 1995. Facendo un confronto con il Registro dei tumori danese, su oltre 1 milione di anni/persona di osservazione venivano individuati 3391 casi di tumore, una cifra inferiore a quella che ci si sarebbe attesa nella popolazione generale. Non sono stati osservati eccessi di rischio per le neoplasie specifiche (tumori cerebrali e del sistema nervoso, delle ghiandole salivari e leucemia) né variazioni del rischio per questi tumori correlate con la durata dell'uso del telefono, con il tempo trascorso dal primo contratto di utenza, con l'età al momento della sottoscrizione del primo contratto e con il tipo di cellulare (analogico o digitale). Gli autori dello studio hanno, comunque, ammesso che il «periodo di latenza potrebbe essere troppo breve per evidenziare un effetto su stadi precoci o un effetto sui tumori cerebrali a crescita più lenta».

Le valutazioni più recenti sugli effetti biologici a lungo termine dei campi a radiofrequenze coincidono con quelle espresse dall'Organizzazione mondiale della Sanità, secondo la quale «sulla base della letteratura attuale non c'è alcuna evidenza convincente che l'esposizione a campi elettromagnetici o radiofrequenze abbrevi la durata della vita umana, né che induca o favorisca il cancro».

In effetti gli studi epidemiologici disponibili vanno considerati ancora insufficienti per numero, qualità, consistenza o potenza statistica per permettere conclusioni sulla presenza o assenza di correlazione tra l'esposizione ai livelli tipici delle radiofrequenze o delle microonde presenti in ambienti di vita e di lavoro e l'insorgenza di effetti sanitari a lungo termine, che comunque a oggi non trovano conferma negli esperimenti di laboratorio.

Epidemiologia e politiche cautelative

In merito all'identificazione dei rischi sanitari connessi alle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alle frequenze di 50/60 hertz, l'unico tipo di ricerca che abbia fornito evidenze di cancerogenicità, anche se limitate, è rappresentato dalle indagini epidemiologiche. Gli studi più recenti indicano che gli effetti avversi tendono a concentrarsi nelle fasce di popolazione maggiormente esposte e si è portati a ritenere che effetti a lungo termine

Campi elettromagnetici: norme e competenze

Legge 22 febbraio 2001, n. 36:
Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici

Ambito di applicazione:
- tutte le applicazioni civili e militari con eccezione dell'esposizione intenzionale per scopi diagnostici o terapeutici

Finalità della Legge:
- assicurare la tutela della salute dei lavoratori, delle lavoratrici, e della popolazione dagli effetti dell'esposizione a determinati livelli dei campi
- promuovere la ricerca scientifica per la valutazione degli effetti a lungo termine e attivare misure di cautela in applicazione del principio di precauzione
- assicurare la tutela dell'ambiente e promuovere l'innovazione tecnologica e le azioni di risanamento volte a minimizzare l'intensità e gli effetti dei campi

Definizioni e strumenti:
- il limite di esposizione è il valore di campo definito ai fini di tutela della salute da effetti acuti, che non deve essere superato in alcuna condizione di esposizione della popolazione e dei lavoratori
- il valore di attenzione è il valore che non deve essere superato negli ambienti abitativi, scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate, quale misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti a lungo termine
- gli obiettivi di qualità sono:
  1) criteri localizzativi, standard urbanistici, prescrizioni e incentivazioni per l'utilizzo delle migliori tecnologie;
  2) valori dei campi definiti dallo Stato ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione

Competenze dello Stato:
- determinazione dei limiti di esposizione, valori di attenzione e obiettivi di qualità
- coordinamento e promozione della ricerca tecnico-scientifica
- istituzione di un catasto delle sorgenti
- determinazione dei criteri di elaborazione dei piani di risanamento, priorità e tempi di attuazione
- definizione dei tracciati degli elettrodotti con tensione superiore a 150 kV

Competenze delle Regioni e degli Enti locali
- individuazione dei siti per gli impianti di telecomunicazione e procedure autorizzative
- adozione dei piani di risanamento per l'adeguamento ai valori stabiliti dallo Stato
- definizione dei tracciati degli elettrodotti con tensione non superiore a 150 kV
- concorso alla definizione di obiettivi di qualità
- funzioni di controllo e vigilanza

dei campi a bassa frequenza siano associati a livelli di esposizione superiori a 0,4 microtesla, anche se non è stato identificato il meccanismo biologico plausibilmente responsabile.

Nel caso delle radiofrequenze l'elemento da sottolineare è il continuo aumento dei livelli di esposizione della popolazione, legato allo sviluppo del settore delle telecomunicazioni. Potrebbe quindi essere utile adottare politiche che agiscano su questa tendenza, favorendo riduzioni progressive delle esposizioni, anche attraverso l'innovazione tecnologica. Nello stesso tempo non dovrebbero essere abbandonati studi e ricerche atti a fornire elementi per la valutazione di eventuali rischi non ancora accertati.

In un documento dell'OMS del 2000, sono state richiamate origini e definizioni di tre diversi tipi di politiche cautelative, nate per affrontare problemi di carattere sanitario in situazioni caratterizzate da incertezza scientifica: il principio di precauzione, la *prudent avoidance*, il principio ALARA.

Il principio di precauzione è una politica di gestione del rischio da applicare, in attesa dei risultati della ricerca scientifica, in circostanze caratterizzate da un alto grado di incertezza scientifica e da un rischio potenzialmente serio.

La prudent avoidance - suggerita nel 1989 all'Office of Technology Assessment degli Stati Uniti da Granger Morgan, Keith Florig e Indira Nair della Carnegie Mellon University come strategia di gestione del rischio per i campi elettrici e magnetici a frequenza industriale - suggerisce l'adozione di provvedimenti semplici, anche in assenza di rischi dimostrabili, purché tali provvedimenti siano di agevole applicazione e a basso costo.

ALARA (acronimo di *As Low As Reasonably Achievable*) indica una politica atta a minimizzare rischi noti per effetti «senza soglia», cercando di mantenere le esposizioni al livello più basso possibile, tenuto conto dei costi della tecnologia disponibile, dei benefici in termini di salute pubblica e sicurezza e di altri elementi di natura socio-economica. Il principio ALARA è utilizzato principalmente ai fini della protezione dalle radiazioni ionizzanti, ambito in cui i limiti di esposizione sono stabiliti non sulla base di «livelli soglia», ma secondo la filosofia del rischio accettabile. Da quanto detto risulta chiaro che il principio ALARA non può applicarsi ai campi elettromagnetici (che si tratti di linee elettriche o di campi a radiofrequenza), data l'assenza di conoscenze certe sull'andamento del rischio in funzione del livello espositivo.

Nello stesso documento, l'OMS afferma che si possono adottare strategie improntate alla prudent avoidance, ma sottolinea l'importanza che, in tal caso, venga spiegato all'opinione pubblica che alla base delle misure adottate non ci sono ragioni sanitarie, ma un puro scrupolo cautelativo. Ciò per evitare il disorientamento di fronte a misure di diversa entità prese da differenti autorità o in tempi successivi.

Più recentemente la stessa OMS si è occupata dell'applicabilità del principio di precauzione alla problematica dei campi elettromagnetici. In un seminario svoltosi a Roma nel maggio 2001 sono stati approfonditi alcuni temi, in particolare la natura del principio di precauzione, che per definizione si applica nelle situazioni caratterizzate da margini di incertezza scientifica, con l'obiettivo di prevenire possibili effetti avversi, giungendo alla scelta di una particolare politica da adottare dopo avere esaminato vantaggi e svantaggi di diverse alternative e avere preso in considerazione le specifiche problematiche dei rischi non volontari e dell'equità nella distribuzione di benefici e rischi.

Secondo l'approccio tradizionale della Sanità pubblica, una volta assodato che la presenza di certi fattori produce determinati effetti, si stabilisce una politica di prevenzione. Se si adotta il principio di precauzione - affermatosi nelle politiche ambientali prima che nel settore sanitario - si ritiene ragionevole agire anche di fronte a evidenze limitate (per esempio, in presenza di alcune correlazioni statistiche fra due eventi, ma in assenza di prove che dimostrino un nesso causale fra essi), riservandosi di modificare le scelte fatte alla luce di eventuali nuove conoscenze.

Per esemplificare: quando esista una pur limitata evidenza di rischio di leucemia infantile aumentato nelle abitazioni con livelli di esposizione a campi ELF più elevati, la politica di prudent avoidance suggerirà di far passare un nuovo elettrodotto a una buona distanza da un asilo infantile, ma non porterà a demolire un impianto già esistente per allontanarlo maggiormente dall'abitato. Un approccio basato sul principio di precauzione potrà invece prevedere misure più drastiche, come la demolizione di linee troppo vicine agli edifici.

La consapevolezza del conflitto derivante dall'inevitabile quota di arbitrarietà sottesa alle scelte di politica cautelativa deve portare alla ricerca di soluzioni che coniughino la conoscenza scientifica (pur con le sue incertezze) all'azione di Sanità pubblica. Se questo processo è svolto con trasparenza, si può costruire un consenso che coinvolga tecnici, politici e popolazione.

Il ruolo della ricerca scientifica

I campi elettromagnetici sono stati oggetto di un numero particolarmente elevato di studi in molti paesi, ma sul piano delle conoscenze restano parecchie lacune che devono essere colmate.

Ahlbom e Greenland concordano nel suggerire di concentrare i futuri studi su popolazioni esposte a campo magnetico a 50/60 hertz. L'indicazione è sostenuta anche da alcune osservazioni relative alla comparsa di disturbi neurocomportamentali in popolazioni esposte a livelli elevati di campi ELF. Va sottolineato che lo studio epidemiologico di tali disturbi più complesso dello studio dell'incidenza dei tumori (eventi rari, gravi e oggetto di accertamenti diagnostici standardizzati). Lo studio dei disturbi neurocomportamentali richiede gruppi di lavoro interdisciplinari costituiti da neurologi, psichiatri e altri specialisti, fra cui endocrinologi e immunologi, e l'utilizzo di protocolli validati.

È inoltre necessario disporre di dati relativi alla distribuzione dei livelli di esposizione a campi ELF nella popolazione, da ottenersi con studi campionari e affinando i modelli di previsione.

Per quanto riguarda l'esposizione a radiofrequenze sarà opportuno approfondire gli studi sulle popolazioni residenti in prossimità dei siti in cui si concentrano impianti di diffusione radiotelevisiva, costituendo gruppi di lavoro nei quali operino in modo integrato epidemiologi ed esperti del monitoraggio.

BIBLIOGRAFIA

COMBA P. e altri, *Rischio cancerogeno associato a campi magnetici a 50-60 Hz*, Rapporto ISTISAN 95/29 – Istituto superiore di Sanità, Roma 1995.

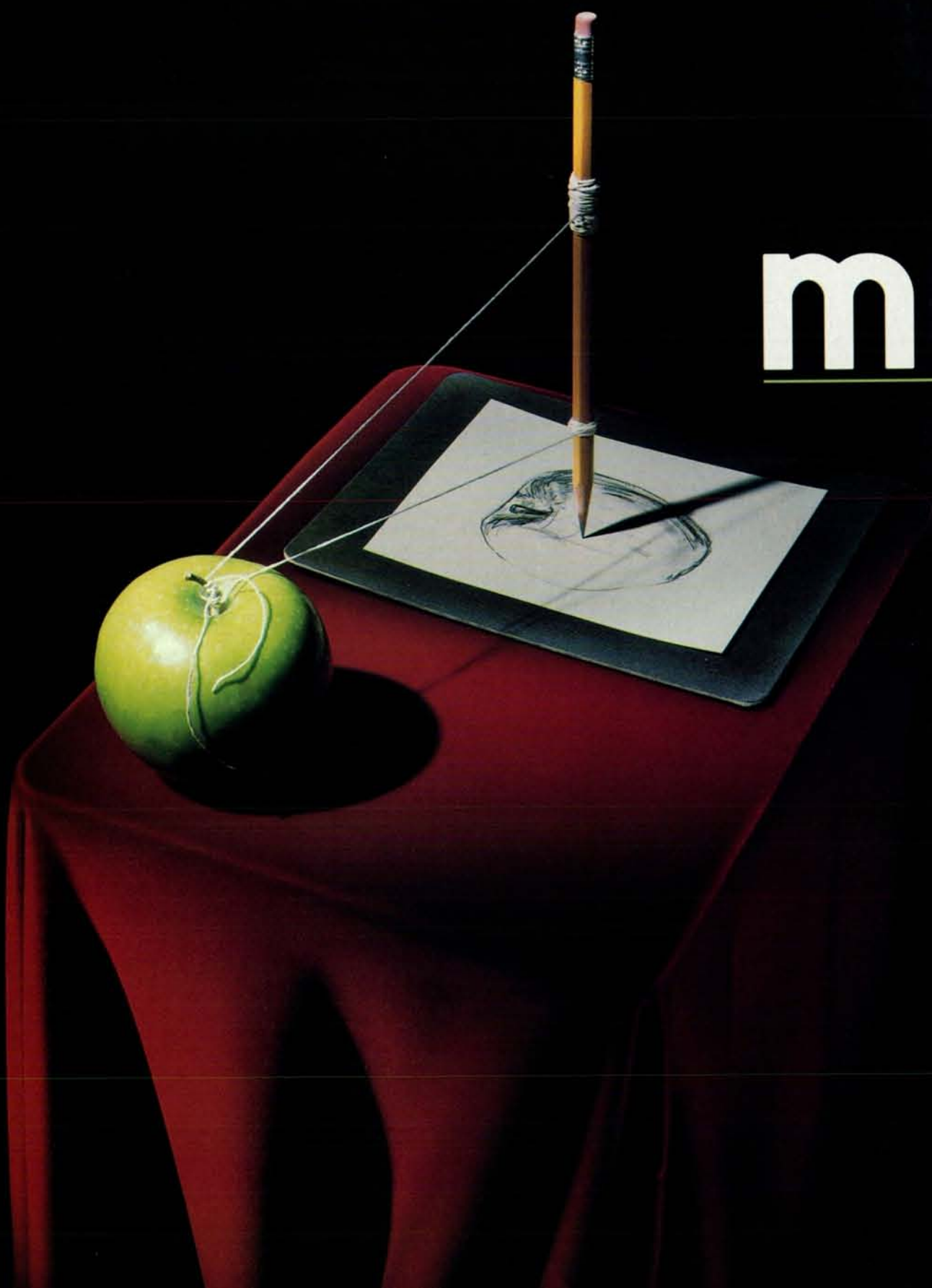
NRC, *Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields*, National Academy Press, Washington, DC., 1997.

ISPESL-ISS, *Documento congiunto sulla problematica della protezione dei lavoratori e della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici e magnetici a frequenze comprese fra 0 Hz e 300 GHz*, «Fogli di informazione ISPESL», n. 4, pp. 1-23, 1997.

NIEHS, *Report on Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields*, NIH Publication n. 99-4493, Research Triangle Park, NC (USA), 1998.

ICNIRP, *Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*, in «Health Physics», 74, pp. 494-522, 1998.

LAGORIO S. e SALVAN A., *Leucemia infantile ed esposizione a campi magnetici a 50/60 Hz: una rassegna delle evidenze epidemiologiche al 2000*, «Ann. Ist. Sup. Sanità», 37, n. 2, pp. 213-224, 2001.

LAGORIO S. e altri, *Tumori del distretto cervico-encefalico e uso dei telefoni cellulari: uno studio epidemiologico internazionale*, «Notiziario dell'Istituto Superiore di Sanità», vol. 14, n. 2, 2001.

Andate e moltiplicatevi

Gli esseri viventi lo fanno; ma le macchine? Recenti simulazioni al calcolatore fanno pensare che anche i sistemi artificiali possano riprodursi

Dalle mele si ottengono mele; ma le macchine possono generare macchine? Oggi è necessario un complesso apparato di fabbricazione per produrre anche una macchina semplice. È possibile dare a un dispositivo artificiale la capacità di moltiplicarsi per conto proprio? L'autoreplicazione è stata a lungo considerata una delle proprietà fondamentali che distinguono gli esseri viventi dalla materia inanimata. Storicamente, la nostra limitata comprensione del processo della riproduzione biologica lo ha avvolto in un'aura di mistero, facendo apparire quanto mai improbabile che potesse essere eseguito da un oggetto artificiale. Si narra che, quando René Descartes disse a Cristina di Svezia che gli animali non sono niente più che automi meccanici, la regina indicò un orologio e disse: «Vediamo se produce un figlio».

Il problema dell'autoreplicazione delle macchine si trasferì dall'ambito della filosofia a quello della scienza e dell'ingegneria alla fine degli anni quaranta, con il lavoro dell'eminente matematico e fisico John von Neumann. Alcuni ricercatori hanno realmente costruito dispositivi in grado di replicarsi; 40 anni fa, per esempio, il genetista Lionel Penrose e suo figlio Roger (il famoso fisico) realizzarono piccoli costrutti di compensato che esibivano una semplice forma di autoreplicazione. Ma ottenere l'autoreplicazione

di Moshe Sipper e James A. Reggia

Illustrazioni di David Emmite

nelle macchine si è rivelato così difficile che la maggior parte dei ricercatori la studia grazie allo strumento puramente concettuale ideato da von Neumann: gli automi cellulari bidimensionali.

In un calcolatore, gli automi cellulari possono simulare un'enorme varietà di dispositivi autoreplicanti in una serie di ambienti che equivalgono a universi con leggi fisiche diverse dalle nostre. Simili modelli fanno sì che i ricercatori non debbano preoccuparsi di problemi logistici, come l'energia e la costruzione materiale, e possano invece concentrarsi sui problemi fondamentali del flusso dell'informazione. Come è possibile che un essere vivente sia capace di replicarsi da solo, mentre gli oggetti meccanici devono essere costruiti? Come è possibile che la replicazione di un organismo si attui dalle interazioni fra tessuti, cellule e molecole? In che modo l'evoluzione darwiniana ha dato origine a organismi autoreplicanti?

Le risposte che stanno via via emergendo hanno ispirato lo sviluppo di chip di silicio in grado di autoripararsi e di molecole autocatalizzanti; e questo potrebbe essere solo l'inizio. I ricercatori nel campo della nanotecnologia affermano da tempo che l'autoreplicazione sarà cruciale per costruire macchine a scala molecolare, mentre i sostenitori dell'esplorazione spaziale vedono una versione macroscopica del processo come un modo per colonizzare i pianeti usando i materiali disponibili sul posto. Recenti risultati sembrano rendere meno incredibili queste idee futuristiche. Come accade in altri settori della scienza, quali l'ingegneria genetica, la produzione di energia nucleare e la chimica, gli scienziati che studiano l'autoreplicazione si trovano di fronte la duplice sfida di creare macchine autoreplicanti e nel contempo di evitare la terribile possibilità che simili dispositivi «impazziscano». Idealmente, il progredire della conoscenza ci aiuterà a separare le buone tecnologie da quelle distruttive.

Giocare alla vita

Le storie di fantascienza spesso descrivono l'autoreplicazione cibernetica come un naturale sviluppo della tecnologia attuale, ma così facendo non tengono conto di un gravissimo problema: quello del regresso all'infinito. Un sistema potrebbe tentare di costruire un clone usando un progetto, vale a dire un'autodescrizione. Ma l'autodescrizione è parte della macchina, o no? Se è così, che cosa descrive la descrizione? E che cosa descrive la descrizione della descrizione? L'autoreplicazione in questo caso sarebbe come chiedere a un architetto di fare un rilievo perfetto del suo stesso studio. Il rilievo dovrebbe contenere una versione in miniatura di se stesso, la quale conterrebbe una versione in miniatura di se stessa, e così via. Senza questa informazione, un'impresa di costruzioni sarebbe incapace di ricreare completamente lo studio: dove si trovava il progetto ci sarebbe uno spazio vuoto.

La grande intuizione di von Neumann fu una spiegazione di come interrompere il regresso all'infinito. Egli capì che l'autodescrizione può essere usata in due modi distinti: in primo luogo come insieme di istruzioni la cui interpretazione porta alla costruzione di una copia perfetta del dispositivo; e poi come dati da copiare, senza interpretazione, e allegare alla progenie appena creata, in modo che anche questa possegga la capacità di autoreplicarsi. In questo processo a due fasi, l'autodescrizione non contiene una descrizione di se stessa. Nell'analogia dell'architetto, il rilievo conterrebbe un progetto per costruire una fotocopiatrice. Una volta che il nuovo studio e la fotocopiatrice fossero stati costruiti, i costruttori farebbero semplicemente una copia del rilievo e la metterebbero nel nuovo studio.

Le cellule viventi usano la propria autodescrizione, che gli scienziati chiamano genotipo, esattamente in questi due modi: trascrizione (il DNA viene copiato, per lo più senza interpretazione, in RNA messaggero, o mRNA) e traduzione (l'mRNA viene interpretato per sintetizzare le proteine). Von Neumann fece questa distinzione fra trascrizione e traduzione molti anni prima dei biologi molecolari, e il suo lavoro è stato fondamentale per capire l'autoreplicazione in natura.

Per dimostrare queste idee, von Neumann e il matematico Stanislaw M. Ulam svilupparono l'idea di automa cellulare. Una simulazione con automi cellulari comprende una griglia di quadrati, o celle, simile a una scacchiera; ognuno dei quadrati può essere vuoto od occupato da uno di una serie di possibili componenti. A intervalli di tempo discreti, ogni cella guarda se stessa e le sue vicine e decide se trasformarsi in un altro componente. Nel prendere questa decisione, la cella segue regole relativamente semplici, che sono le stesse per tutte le celle e che costituiscono le «leggi fisiche» del mondo degli automi cellulari. Tutte le decisioni e le azioni avvengono localmente; le celle non hanno conoscenza di ciò che sta avvenendo al di fuori delle loro immediate vicinanze.

L'apparente semplicità degli automi cellulari è ingannevole; essa non implica facilità di progetto o povertà di comportamento. Il più famoso automa, il gioco «Vita» di John Horton Conway, produce schemi incredibilmente complicati. Molti problemi sul comportamento dinamico degli automi cellulari sono formalmente irresolubili. Per vedere come si sviluppi uno schema, è necessario simularlo totalmente. A suo modo, un modello di automa cellulare può essere complicato quanto il mondo reale.

Macchine per copie

All'interno degli automi cellulari, l'autoreplicazione avviene quando un gruppo di componenti - una «macchina» - passa attraverso una sequenza di passaggi per costruire un duplicato di se stesso. La macchina di von Neumann era basata su un costruttore universale: una macchina che, date le istruzioni appropriate, poteva creare qualsiasi schema. Il costruttore consisteva di numerosi tipi di componenti suddivisi in decine di migliaia di celle e richiedeva un manuale di centinaia di pagine per essere descritto completamente: non è ancora stato simulato interamente, né tanto meno costruito, proprio per la sua complessità. Nel gioco «Vita» un simile costruttore apparirebbe ancora più complicato, poiché le funzioni svolte da ogni singola cella nel modello di von Neumann - come la trasmissione di segnali e la generazione di nuovi componenti - devono essere svolte nel gioco da strutture composite.

Andando all'estremo opposto, è facile trovare esempi banali di autoreplicazione. Per esempio, supponiamo di avere un automa cellulare con un solo tipo di componente, indicato con +, e che ciascuna cella segua una sola regola: se esattamente una delle quattro celle vicine contiene un +, allora la cella diventa un +; altrimenti si svuota. Con questa regola, un singolo + cresce in quattro ulteriori +, ognuno dei quali cresce allo stesso modo, e così via.

Una simile proliferazione infestante non getta molta luce sui principi della replicazione, dato che non c'è una macchina significativa. Ovviamente, questo fa sorgere la domanda di come distinguere una macchina «significativa» da un automa banalmente prolifico: nessuno ha ancora trovato una risposta soddisfacente. Ciò che è chiaro, tuttavia, è che la struttura che si replica deve essere in qualche modo complessa. Per esempio, deve essere costituita da molteplici componenti diversi, la cui interazione collettiva permette la replicazione: il proverbiale tutto deve essere maggiore della somma delle parti. L'esistenza di molteplici componenti distinti permette all'autodescrizione di essere memorizzata all'interno della struttura replicante.

Negli anni successivi al lavoro fondamentale di von Neumann, molti ricercatori hanno analizzato il dominio compreso fra il complesso e il banale, sviluppando macchine replicanti che necessitavano di meno componenti, meno spazio o regole più semplici. Un grande passo avanti fu compiuto nel 1984, quando Christopher G. Langton, allora all'Università del Michigan, osservò che dispositivi di immagazzinamento ad anello - che avevano costituito i moduli di precedenti macchine autoreplicanti - potevano essere programmati per replicarsi da soli. Questi dispositivi consistono normalmente di due parti: l'anello stesso, che è una catena di componenti che circolano attorno a un rettangolo, e un braccio di costruzione, che si protende da un angolo del rettangolo nello spazio circostante. I componenti circolanti costituiscono una «ricetta»: per esempio, «vai avanti di tre quadrati, poi gira a sinistra». Quando questa ricetta arriva al braccio di costruzione, le regole dell'automa ne fanno una copia. Una copia continua a svolgere il ciclo; l'altra va lungo il braccio dove viene interpretata come istruzioni.

Rinunciando al requisito di costruzione universale, che era fondamentale nell'approccio di von Neumann, Langton mostrò che un dispositivo replicante può essere costruito con soli sette elementi, che occupano 86 celle. Cicli replicanti ancora più semplici sono stati ideati da uno di noi (Reggia) e dai nostri colleghi (*si veda la finestra alle pagine 50-51*). Poiché essi hanno molteplici componenti interagenti e includono un'autodescrizione, non sono banali. Stranamente, l'asimmetria ha un ruolo inaspettato: le regole che governano la replicazione sono spesso più semplici quando i componenti non sono rotazionalmente simmetrici che quando lo sono.

IN PILLOLE

- Per la sua complessità, il problema dell'autoreplicazione delle macchine viene studiato grazie agli automi cellulari bidimensionali, oggetti puramente concettuali che consentono ai ricercatori di concentrarsi sui problemi di flusso d'informazione.
- L'autodescrizione è un elemento della macchina fondamentale per l'autoreplicazione. Per evitare il regresso all'infinito dell'autodescrizione occorre distinguere tra un insieme di istruzioni da interpretare e un insieme di dati da copiare.
- La simulazione con automi cellulari di von Neumann prevede una griglia di celle, ciascuna delle quali può essere vuota od occupata da uno di una serie possibile di componenti. A intervalli discreti, ogni cella valuta se trasformarsi in un altro componente in base a un dato insieme di regole. In studi recenti, si è verificato che nel caso di una griglia immersa in un brodo primordiale di componenti e dotata di un insieme di regole, può emergere spontaneamente una struttura autoreplicante.

GLI AUTORI

Moshe Sipper e James A. Reggia si interessano da tempo all'autorganizzazione di sistemi complessi. Sipper è professore al Dipartimento di informatica della Ben-Gurion University di Israele e ricercatore ospite del Logic Systems Laboratory del Politecnico Federale di Losanna. Si interessa principalmente di paradigmi di calcolo ispirati alla biologia, come la simulazione di processi evolutivi, i sistemi autoreplicanti e gli automi cellulari. Reggia è professore di informatica e neurologia e lavora all'Institute for Advanced Computer Studies dell'Università del Maryland. Oltre a studiare l'autoreplicazione, svolge ricerche su modelli al calcolatore del cervello e delle sue patologie.

Costruite un ciclo autoreplicante

Simulare un ciclo autoreplicante usando una normale scacchiera è un buon modo per avere un'idea di come funzionano questi sistemi.

Questo particolare modello di automa cellulare ha quattro diversi componenti: pedoni, cavalli, alfieri e torri. La macchina è costituita inizialmente da quattro pedoni, un cavallo e un alfiere, e comprende due parti: il ciclo stesso, che occupa un quadrato due per due, e un braccio costruttore, che si protende verso destra.

Il cavallo e l'alfiere rappresentano l'autodescrizione: il cavallo, la cui orientazione è importante, determina la direzione della crescita, mentre l'alfiere lo segue e determina la lunghezza del lato del ciclo.

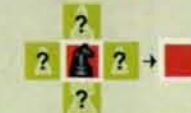
I pedoni infine sono riempitivi che definiscono il resto della forma del ciclo, e la torre è un segnale transitorio che guida la crescita di un nuovo braccio costruttore.

Via via che il tempo passa, il cavallo e l'alfiere si muovono in senso antiorario attorno al ciclo. Ogni volta che incontrano il braccio, una copia si dirige su di esso, mentre l'originale continua lungo il ciclo.

Come giocare: Avete bisogno di due scacchiere: l'una che rappresenta la configurazione attuale e l'altra per «calcolare» la configurazione seguente. A ogni turno, guardate tutte le caselle della configurazione attuale, consultate le regole e collocate il pezzo appropriato nella casella corrispondente dell'altra scacchiera. Ogni pezzo si trasforma a seconda della sua identità e di quella dei quattro quadrati immediatamente a destra, a sinistra, sopra e sotto. Quando avete considerato ogni casella e costruito la configurazione successiva, il turno è finito: sgombrate la prima scacchiera e ricominciate. Poiché le regole sono complicate, all'inizio ci vuole un po' di pazienza. Potete però guardare una simulazione all'indirizzo: lslwww.epfl.ch/chess

La direzione in cui guarda il cavallo è importante. Nei nostri disegni abbiamo usato le notazioni convenzionali degli scacchi per indicare l'orientazione del pezzo: il muso del cavallo punta in avanti. Quando non vale alcuna regola specifica, il contenuto di una casella resta lo stesso. Le caselle al bordo vanno considerate come se avessero caselle vuote adiacenti, fuori dalla scacchiera.

CAVALLO

Se c'è un alfiere appena dietro o a sinistra del cavallo, sostituite il cavallo con un altro alfiere.

Altrimenti, se almeno una delle caselle adiacenti è occupata, togliete il cavallo e lasciate vuota la casella.

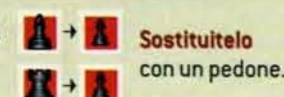
PEDONE

Se c'è un cavallo adiacente, sostituite il pedone con un cavallo, la cui orientazione viene determinata come segue:

Se il cavallo adiacente sta guardando lontano dal pedone, il nuovo cavallo guarda nella direzione opposta.

Diversamente, se c'è esattamente un pedone adiacente, il nuovo cavallo guarda quel pedone.

Diversamente, il nuovo cavallo guarda nella stessa direzione del cavallo adiacente.

ALFIERE O TORRE

Sostituitelo con un pedone.

CASELLA VUOTA

Se ci sono due cavalli adiacenti e uno dei due guarda la casella vuota, riempitela con una torre.

Se c'è solo un cavallo adiacente e guarda la casella, riempitela con un cavallo ruotato di 90 gradi in senso antiorario.

Se c'è un cavallo adiacente con il fianco sinistro che guarda la casella e le altre caselle adiacenti sono vuote, riempite la casella con un pedone.

Se c'è una torre adiacente e le altre caselle sono vuote, riempite la casella con un pedone.

Se ci sono tre pedoni adiacenti, riempite la casella con un cavallo che guarda la quarta casella vuota.

Stadi della replicazione

Inizialmente l'autodescrizione, o «genoma» - un cavallo seguito da un alfiere - è posizionata all'inizio del braccio costruttore.

1 Il cavallo e l'alfiere si muovono in senso antiorario lungo il ciclo; un clone del cavallo esce lungo il braccio costruttore.

2 La coppia originale cavallo-alfiere continua a circolare. L'alfiere viene clonato e segue il nuovo cavallo fuori dal braccio.

3 Il cavallo induce la formazione di due angoli del ciclo figlio, mentre l'alfiere lo segue, completando il trasferimento genico.

4 Il cavallo costruisce il rimanente angolo del processo figlio. I cicli sono connessi dal braccio costruttore e da un cavallo errante.

George Retseck

5 Il cavallo errante si muove in alto per fornire al genitore un nuovo braccio. Un simile processo, ritardato di un turno, inizia per il ciclo figlio.

6 Il cavallo errante, assieme alla coppia originale cavallo-alfiere, crea una torre. Nel frattempo viene cancellato il vecchio braccio.

7 La torre uccide il cavallo e genera il nuovo braccio, diretto verso l'alto. Un'altra torre si prepara a fare la stessa cosa per il ciclo figlio.

8 Finalmente i due cicli sono separati e integri; l'autodescrizione continua a circolare, ma per il resto tutto è tranquillo.

9 Il ciclo genitore a questo punto si prepara a procreare nuovamente; nel passo successivo anche il figlio inizia a replicarsi.

Replicazione emergente

Tutte queste strutture autoreplicanti sono state progettate ingegnosamente attraverso molti tentativi ed errori. Si tratta di un processo arduo e spesso frustrante; un piccolo cambiamento in una delle regole si traduce in un comportamento globale completamente diverso, e molto probabilmente nella disintegrazione della struttura. Ma i lavori più recenti sono andati oltre la progettazione diretta. Anziché adattare le regole a un particolare tipo di struttura, i ricercatori hanno svolto esperimenti con vari insiemi di regole, hanno riempito la griglia dell'automa cellulare con un «brodo primordiale» di componenti scelti a caso e hanno verificato se emergeva spontaneamente qualche struttura autoreplicante.

Nel 1997, Hui-Hsien Chou, ora alla Iowa State University, e Reggia notarono che, finché la densità iniziale dei componenti liberi di muoversi era superiore a una certa soglia, apparivano normalmente piccoli cicli autoreplicanti. I cicli che collidevano si annichilavano, sicché vi era anche un processo di morte oltre a quello di nascita. Nel tempo, i cicli proliferavano, crescevano in dimensioni ed evolvevano attraverso mutazioni indotte dai detriti di passate collisioni. Sebbene le regole dell'automa fossero deterministiche, queste mutazioni erano realmente casuali, perché il sistema era complesso e i componenti all'inizio avevano posizioni casuali.

Simili cicli sono intesi come macchine astratte e non come i simulacri di qualcosa di biologico, ma è interessante confrontarli con le strutture biomolecolari. Un ciclo assomiglia molto al DNA circolare dei batteri e il braccio di costruzione agisce come l'enzima che catalizza la replicazione del DNA. Cosa ancora più importante, i cicli replicanti illustrano come da semplici interazioni locali possa derivare un comportamento globale complesso. Per esempio, i componenti si muovono intorno al ciclo anche se le regole non specificano nulla sul movimento; ciò che accade in realtà è che le singole celle diventano vive, muoiono o si trasformano in modo tale che uno schema viene eliminato in una posizione e ricostruito altrove: un processo che percepiamo come moto. In breve, l'automa cellulare agisce localmente, ma sembra pensare globalmente. Molto di tutto ciò è vero anche per la biologia molecolare.

In un recente esperimento al calcolatore, Jason Lohn, ora all'Ames Research Center della NASA, e Reggia hanno sperimentato non nuove strutture, ma nuovi insiemi di regole. Iniziando con un blocco arbitrario di quattro componenti, essi hanno scoperto che potevano determinare un insieme di regole tale che il blocco potesse autoreplicarsi. Le regole sono state individuate tramite un algoritmo genetico: un processo automatizzato che simula l'evoluzione darwiniana.

L'aspetto più impegnativo di questo lavoro fu la definizione della cosiddetta funzione di fitness: il criterio attraverso cui vengono giudicati gli insiemi di regole, separando così le soluzioni buone da quelle cattive e guidando il processo evolutivo verso insiemi di regole che facilitano la replicazione. Non si può semplicemente assegnare una fitness alta a quegli insiemi di regole che fanno sì che una struttura si replichi, poiché nessuno degli insiemi iniziali ha buone probabilità di permettere

Robot, cura te stesso

I calcolatori in grado di ripararsi da soli sono la prima applicazione dell'autoreplicazione artificiale

di George Musser
(redazione di «Scientific American»)

Losanna, Svizzera - Non sono certo molti i ricercatori che incoraggiano la distruzione selvaggia delle loro apparecchiature. Daniel Mange, invece, è soddisfattissimo quando i visitatori si avvicinano a una delle sue invenzioni e premono il bottone KILL. Le luci sul pannello si spengono: una scatoletta piena di circuiti è bruciata. All'inizio di maggio il gruppo di Mange ha presentato il suo ultimo congegno a un'esposizione scientifica - un orologio digitale grande quanto una parete di cui si possono distruggere a piacere i componenti - e ha detto al pubblico: vedete se riuscite a distruggere il sistema.

L'obiettivo di Mange è quello di fornire ai circuiti elettronici la capacità di prendere una batosta e continuare a funzionare, proprio come gli esseri viventi. Gli organismi di carne e ossa possono non essere molto abili a calcolare π fino alla milionesima cifra decimale, ma passano tranquillamente i loro giorni senza che nessuno prema Ctrl-Alt-Del. Combinare la precisione dell'hardware digitale con la resistenza dei tessuti biologici è una delle sfide principali della moderna elettronica.

Da quando esiste l'elettronica gli ingegneri tentano di costruire circuiti in grado di tollerare i guasti. I modem dei computer trasmetterebbero ancora dati a 1200 baud se non fosse per l'individuazione e la correzione degli errori. In molte applicazioni semplici controlli di qualità, come bit di dati aggiuntivi, sono sufficienti. Sistemi più complessi hanno interi computer di scorta. Lo space shuttle, per esempio, ha cinque elaboratori: quattro svolgono gli stessi calcoli, mentre il quinto controlla se sono in accordo tra di loro ed esclude il dissenziente. Il problema, però, è che questi sistemi dipendono da un controllo centralizzato. Che cosa succede se a fallire è l'unità di controllo?

La natura ha risolto questo problema attraverso una radicale decentralizzazione. Le cellule in un organismo sono fondamentalmente identiche; ognuna si assume un compito specializzato, lo svolge autonomamente e, in caso di infezione o fallimento, si suicida, in modo che i suoi compiti possano essere assunti da altre cellule. Questi sono gli attributi che Mange, docente presso il Politecnico Federale, e altri cercano di emulare nei circuiti fin dal 1993, nell'ambito del progetto «Embryonics».

Una delle loro prime invenzioni, la cellula artificiale MICTREE (*microinstruction tree*), consiste in un semplice processore e quattro bit di memoria. La cellula è contenuta in una scatola di plastica di meno di 10 centimetri di lato. I contatti elettrici si trovano lungo i fianchi e le cellule possono essere collegate tra di loro come i mattoni del Lego. Come gli automi cellulari, le cellule MICTREE sono collegate solo a quelle immediatamente vicine. La comunicazione a carico di ogni cellula è quindi indipendente dal numero totale di cellule. Il sistema, in altre parole, è facilmente scalabile, a differenza di molte architetture parallele.

Le cellule seguono le istruzioni contenute nel loro «genoma», un programma scritto in un sottoinsieme del linguaggio Pascal. Come i loro analoghi biologici, tutte le cellule contengono lo stesso genoma e ne eseguono una parte a seconda della loro posizione nella griglia, che ogni cellula calcola relativamente alle proprie vicine. Nonostante appaia poco efficiente, questa ridondanza permette alla griglia di tollerare la perdita di qualsiasi cellula. Ogni volta che qualcuno preme il pulsante KILL su una cellula, essa si spegne e quelle immediatamente alla sua destra e sinistra diventano direttamente connesse. La vicina di destra ricalcola la propria posizione e inizia a eseguire il programma della cellula deceduta. I suoi precedenti compiti vengono assunti dalla cellula alla sua destra, e così via, fino a che non entra in servizio una cellula designata come sostituta.

UN CALCOLATORE A PROVA DI GUASTO è una griglia bidimensionale di cellule artificiali, ciascuna dotata di un semplice processore. In questa applicazione, quattro cellule funzionano come un cronometro, una per ogni cifra. Ciascuna cellula conta fino a cinque o a nove, a seconda delle sue coordinate nella matrice. Le cellule rimanenti sono ricambi, pronti a entrare in azione se una cellula si guasta o viene uccisa. Il dispositivo Biodule 601 qui mostrato è basato sull'architettura MICTREE descritta nel testo.

Scrivere programmi per qualsiasi calcolatore parallelo è difficile, ma MICTREE richiede un approccio decisamente poco convenzionale. Anziché dare istruzioni esplicite, il programmatore deve ideare semplici regole da cui emergerà la funzione desiderata. Essendo svizzero, Mange ha scelto per la sua dimostrazione di costruire un cronometro superaffidabile. Per mostrare i minuti e i secondi occorrono quattro cellule in fila, una per ciascuna cifra. Il genoma permette due tipi di cellule: un contatore da zero a nove e un contatore da zero a cinque. Un oscillatore invia un impulso per secondo alla cellula più a destra. Dopo dieci impulsi, questa cellula ritorna a zero e trasmette un impulso a quella alla sua sinistra, e così via lungo la fila. L'orologio occupa una parte di una griglia di 12 cellule; se ne uccidete una, l'orologio si sposta una cellula più in là e continua a funzionare. Ovviamente, c'è un limite alla sua resistenza: l'intero dispositivo smetterà di funzionare dopo otto uccisioni.

La potenza di elaborazione delle cellule MICTREE prototipo non può essere adattata a seconda dell'applicazione voluta. In un prodotto finito, le cellule farebbero invece parte di una griglia di porte programmabile, ossia una schiera di componenti elettronici che possono essere riconfigurati in tempo reale. Il gruppo di Mange sta progettando una simile griglia, chiamata MUXTREE (*multiplexer tree*), che è ottimizzata per le cellule artificiali. Nella metafora biologica, i componenti di questa griglia sono le «molecole» che costituiscono una cellula. Ognuna consiste di una porta logica, un bit di dati e una stringa di bit di configurazione che determina la funzione della porta.

Costruire una cellula per mezzo di queste molecole offre non solo flessibilità, ma anche ulteriore resistenza. Ogni molecola contiene due copie della porta e tre del bit di memoria. Se due porte dessero un risultato diverso, la molecola si ucciderebbe per il bene della cellula. Come «testamento», la molecola invia il suo bit di dati (salvato in triplice copia) e la sua configurazione alla vicina di destra, che fa la stessa cosa, e il processo continua fino a quando la molecola più a destra non trasferisce i propri dati a una di scorta. Questo secondo livello di tolleranza ai guasti impedisce a un singolo errore di distruggere l'intera cellula.

Duemila molecole, divise in quattro cellule 20 per 25, formano BioWall, il gigantesco orologio digitale che il gruppo di Mange ha esposto. Ogni molecola è racchiusa in una scatoletta con un pulsante KILL e un display LED. Alcune molecole sono configurate per eseguire calcoli, altre servono come pixel nello schermo dell'orologio. Facendo abbondante uso del pulsante KILL ho fatto di tutto per fermare il sistema; ma il prode orologio non ha ceduto. Lo schermo dell'orologio ha iniziato a presentare uno strano aspetto - i numeri si piegavano quando i loro pixel si spostavano verso destra - ma era ancora leggibile, a differenza della maggior parte degli schermi elettronici guasti.

Il sistema aveva comunque problemi allo schermo, che Mange attribuì a difetti di sincronizzazione. Sebbene la potenza di calcolo sia decentralizzata, le cellule dipendono da un oscillatore centrale per coordinare le comunicazioni, e talvolta perdono sincronia. Un altro gruppo Embryonics, guidato da Andy Tyrrell dell'Università di York, in Inghilterra, ha studiato la possibilità di rendere le cellule asincrone, come le loro controparti biologiche. Le cellule si scambierebbero segnali appositi per orchestrare il trasferimento dei dati. Il sistema attuale è anche incapace di individuare alcuni tipi di errore, come eventuali danni nella stringa di configurazione. Il gruppo di Tyrrell ha proposto di aggiungere molecole di sorveglianza - un sistema immunitario - che controllino le configurazioni alla ricerca di difetti.

Questi sistemi richiedono una ridondanza enorme, ma ciò vale anche per altri tipi di tecnologie a prova di guasto. «Dal punto di vista della ridondanza, l'Embryonics non è così male, se confrontato con altri sistemi» dice Tyrrell. Inoltre, MUXTREE dovrebbe essere facile da scalare fino al livello nanoscopico; le «molecole» sono abbastanza semplici da poter essere realmente molecole. Secondo Mange, «stiamo preparandoci al momento in cui l'elettronica avrà la stessa scala della biologia».

Embryonics si avvicina al sogno di costruire una macchina autoreplicante. Non è impressionante quanto un robot che vada a un negozio di parti di ricambio, prenda pezzi dagli scaffali e, giunto a casa, ripari una connessione o si costruisca un partner. Ma l'effetto è simile. Lasciare che le macchine determinino il loro destino - decidendo se riconfigurarsi su un chip o riprogrammarsi usando una rete neurale o un algoritmo genetico - appare spaventoso, ma forse dovremmo essere gratificati da macchine sempre più simili a noi: imperfette, fallibili, ma testardamente ricche di risorse.

la replicazione. La soluzione fu quella di escogitare una funzione di fitness composta dalla somma pesata di tre misure: una misura di crescita (la velocità a cui ciascun tipo di componente genera quantità crescenti di quel componente), una misura di posizione relativa (il grado in cui i componenti vicini restano insieme) e una misura di replicazione (una funzione del numero delle strutture replicanti realmente presenti). Con la giusta funzione di fitness, l'evoluzione può rendere prolifici insiemi di regole sterili; il processo di solito richiede circa 150 generazioni.

Le strutture autoreplicanti create in questo modo funzionano in modo profondamente diverso rispetto ai cicli autoreplicanti. Per esempio, si muovono e depositano copie lungo il percorso, a differenza dei cicli autoreplicanti che sono essenzialmente statici. E sebbene queste nuove strutture replicanti consistano di componenti multipli localmente interagenti, esse non hanno un'autodescrizione identificabile: non c'è un «genoma». La capacità di replicarsi senza un'autodescrizione potrebbe essere importante per chiarire molti problemi relativi all'origine dei primissimi organismi replicanti. In un certo senso, stiamo cominciando a intravvedere un *continuum* tra le strutture viventi e quelle non viventi.

Molti ricercatori hanno sperimentato altri modelli oltre agli automi cellulari tradizionali. In un automa cellulare asincrono, le celle non vengono tutte aggiornate contemporaneamente; nell'automa cellulare non uniforme, le regole possono variare da cella a cella. Un ulteriore approccio è quello di «Guerra dei nuclei» e dei suoi successori, come il sistema «Tierra» dell'ecologo Thomas S. Ray. In queste simulazioni gli «organismi» sono programmi per computer che competono per tempo di esecuzione e memoria. Ray ha osservato l'emergere di «parassiti» che si appropriano del codice di autoreplicazione di altri organismi.

Passando alla realtà

Ma allora, come funzionano queste macchine? Il costruttore universale di von Neumann può effettuare calcoli oltre a replicarsi, ma è decisamente poco pratico. Un progresso importante è stato lo sviluppo di dispositivi autoreplicanti semplici ma utili. Nel 1995 Gianluca Tempesti del Politecnico Federale di Losanna semplificò l'autodescrizione del ciclo in modo da poterla accoppiare con un piccolo programma: in quel caso, un programma per scrivere l'acronimo del suo laboratorio, «LSL». La sua intuizione fu quella di creare regole per l'automa che permettono ai cicli di replicarsi in due stadi. Per prima cosa il ciclo - come quello di Langton - fa una copia di se stesso; una volta che ha terminato, il ciclo figlio invia un segnale al genitore, che a sua volta spedisce le istruzioni per scrivere le lettere dell'acronimo.

Scrivere l'acronimo era solo una funzione dimostrativa. L'anno seguente Jean-Yves Perrier, Jacques Zahnd e uno di noi (Sipper) progettarono un ciclo autoreplicante con capacità di calcolo universali, vale a dire con la potenza di calcolo di una macchina di Turing universale: un vero e proprio computer altamente semplificato. Questo ciclo ha due «nastri», o lunghe catene di componenti, l'uno per il programma e l'altro per i dati: in tal modo, oltre a replicarsi, può eseguire un programma arbitrario. In un certo senso, questi cicli sono complessi quanto il computer che li simula. La loro limitazione principale è il fatto che il programma viene copiato senza modifiche dal genitore al figlio, così che tutti i cicli svolgono la stessa serie di istruzioni.

Nel 1998 Chou e Reggia eliminarono anche questa limitazione, mostrando come cicli autoreplicanti che trasportano informazioni distinte, anziché un programma clonato, possano essere usati per risolvere il problema della soddisfacibilità. Impiegando i cicli è possibile determinare se alle variabili di una espressione logica possano essere assegnati valori che rendono l'intera espressione «vera». Questo problema è NP-completo: in altre parole, appartiene a una famiglia di difficili rompicapo, fra cui anche il famoso problema del commesso viaggiatore, per i quali non sono note soluzioni efficienti. Nell'universo dell'automa cellulare di Chou e Reggia, ogni ciclo autoreplicante riceve una soluzione parziale diversa. Durante la replicazione, le soluzioni mutano e i cicli con soluzioni promettenti possono replicarsi, mentre quelli con soluzioni palesemente erronee muoiono.

Sebbene vari gruppi abbiano creato automi cellulari nell'hardware elettronico, simili sistemi richiedono probabilmente troppe risorse per trovare applicazioni pratiche; gli automi non sono mai stati intesi per un impiego diretto. Il loro scopo è di chiarire i principi base della replicazione e, così facendo, ispirare progetti più concreti. I cicli forniscono un nuovo paradigma per la progettazione di computer paralleli, funzionanti con normali transistor o con sostanze chimiche.

Nel 1980 un gruppo della NASA guidato da Robert Freitas, Jr., propose di installare sulla Luna una fabbrica autoreplicante, usando materiali lunari, per occupare via via un'area esponenzialmente più vasta. Una sonda di questo genere potrebbe colonizzare l'intera galassia, come ha osservato Frank J. Tipler della Tulane University. In termini più realistici, informatici e ingegneri hanno compiuto esperimenti con la progettazione automatizzata di robot. Sebbene questi sistemi non siano realmente autoreplicanti - i figli sono molto più semplici dei genitori - essi sono un primo passo verso la risposta all'osservazione di Cristina di Svezia.

Se le macchine fisiche autoreplicanti dovessero diventare reali, esse e le relative tecnologie solleveranno problemi ardui, non dissimili da ciò che si vede nel film *Terminator* in cui creature artificiali vincono la competizione con quelle naturali. Noi preferiamo essere ottimisti e ci sembra più probabile che i dispositivi autoreplicanti possano essere utilizzati a beneficio dell'umanità. Sarà fondamentale seguire il consiglio del filosofo inglese del XIV secolo, Guglielmo di Ockham: *entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem*, ossia: le entità non devono essere moltiplicate oltre il necessario.

➡ lslwww.epfl.ch/~ moshes/selfrep/
La pagina Web di Moshe Sipper sull'autoreplicazione artificiale.

➡ necsi.org/postdocs/sayama/sdsr/java/
Animazioni di cicli autoreplicanti.

➡ alife.santafe.edu/alife/topics/jvn/jvn.html
Per saperne di più sulla macchina di John von Neumann.

BIBLIOGRAFIA

REGGIA J., ARMENTROUT S., CHOU H. e PENG Y., *Simple Systems That Exhibit Self-Directed Replication*, in «Science», 259, n. 5099, 26 febbraio 1993.

CHOU H. e REGGIA J., *Emergence of Self-Replicating Structures in a Cellular Automata Space*, in «Physica D», 110, nn. 3-4, 15 dicembre 1997.

SIPPER M., TEMPESTI G., MANGE D. e SANCHEZ E. (a cura), *Special Issue: Von Neumann's Legacy: On Self-Replication*, in «Artificial Life», 4, n. 3, estate 1998.

MANGE D., SIPPER M., STAUFFER A. e TEMPESTI G., *Towards Robust Integrated Circuits: The Embryonics Approach*, in «Proceedings of the IEEE», 88, n. 4, pp. 516-541, aprile 2000.

Piccoli robot crescono

Secondo il pioniere della nanotecnologia molecolare, minuscoli robot rivoluzioneranno la produzione e trasformeranno la società

Nel 1959 il fisico Richard Feynman tenne una conferenza in cui venivano esplorati i limiti della miniaturizzazione. Partendo dalla tecnologia allora disponibile (in tempi in cui le calcolatrici non erano ancora tascabili), esaminò i limiti posti dalle leggi fisiche e terminò accennando alla possibilità - forse addirittura l'inevitabilità - di un metodo di costruzione «atomo per atomo».

Ciò che all'epoca poteva apparire assurdamente ambizioso, persino bizzarro, è diventato ora un obiettivo condiviso da molti. Decenni di progresso tecnologico hanno portato la microelettronica fino alla soglia della scala molecolare, mentre il progresso scientifico a livello molecolare - specialmente riguardo ai meccanismi molecolari dei sistemi viventi - ha reso chiaro a molti ciò che qualche decennio fa solo un genio isolato era in grado di prefigurare.

Ispirati dalla biologia molecolare, gli studi di nanotecnologie avanzate si sono concentrati sulla costruzione «dal basso», in cui macchine molecolari assemblano le parti necessarie per realizzare i prodotti, comprese altre macchine molecolari. La biologia ci mostra che i sistemi di macchine molecolari e i loro prodotti possono essere ottenuti a basso costo e in enormi quantità.

Andando oltre l'analogia biologica, sarebbe un obiettivo naturale riuscire a collocare ogni atomo in una posizione predeterminata (dove fungerebbe da parte di qualche componente attivo o strutturale), senza che altre molecole libere nei dintorni siano di intralcio. Un simile sistema non sarebbe un liquido o un gas, poiché le molecole non si muoverebbero liberamente, ma non sarebbe neppure un solido, in cui le molecole sono fisse al loro posto. Invece, questa nuova materia in «fase macchina» esibirebbe sia i moti molecolari caratteristici dei liquidi e dei gas sia la resistenza meccanica tipicamente associata ai solidi. Il suo volume sarebbe riempito da macchine funzionanti.

Essere in grado di costruire oggetti con precisione molecolare rivoluzionerà i processi produttivi, permettendo di migliorare enormemente le proprietà dei materiali e le prestazioni dei dispositivi. Inoltre, con un processo produttivo in grado di tenere sotto controllo ogni atomo, non ci sarà più bisogno di scaricare rifiuti tossici nell'aria o nell'acqua. Il progresso dei metodi produttivi farà diminuire anche i costi delle celle fotovoltaiche e dei sistemi di immagazzinamento di energia, riducendo così la domanda di petrolio e carbone e quindi l'inquinamento complessivo. Tutto ciò fa sperare che le nazioni in via di sviluppo possano raggiungere gli standard di vita del mondo industrializzato senza causare disastri ambientali. Materiali leggeri, a basso costo ed estremamente resistenti renderanno i trasporti molto più efficienti in termini di energia e potranno persino rendere economico il trasporto nello spazio. Il vecchio sogno di espandere la biosfera oltre il nostro vulnerabile pianeta sembra perciò fattibile.

Forse l'obiettivo più interessante è la riparazione molecolare del corpo umano. Sono stati immaginati nanorobot medici in grado di distruggere virus e cellule tumorali, di riparare strutture danneggiate, di rimuovere i materiali di scarto accumulati nel cervello e di ridare al corpo la sua condizione di salute giovanile. Un'applicazione medica sorprendente sarebbe la possibilità di rianimare, dopo aver riparato i danni cerebrali da essi subìti, i pionieri dell'animazione sospesa (al momento considerati legalmente deceduti), alcuni dei quali sono stati sottoposti alle rudimentali tecniche criogeniche disponibili negli anni sessanta. Le tecniche di «vetrificazione» attuali - che impediscono la formazione di cristalli di ghiaccio che danneggiano i tessuti - dovrebbero facilitare la riparazione, ma anche i processi più antiquati sembrano preservare le strutture del cervello abbastanza bene da permetterne il ripristino.

> In linea di principio, un assemblatore **potrebbe costruire qualunque cosa** comprese copie di se stesso

I ricercatori che hanno familiarità con il campo della nanotecnologia molecolare vedono la base tecnologica di simili capacità lontana ancora alcuni decenni. Al momento, il lavoro si sta concentrando sugli stadi iniziali: scoprire come costruire strutture relativamente grandi con precisione atomica, imparare a progettare macchine molecolari e identificare gli obiettivi intermedi che abbiano la ricaduta più positiva.

Per comprendere le potenzialità della tecnologia di fabbricazione molecolare, è utile osservare i macchinari a scala macroscopica usati oggi nell'industria. Immaginate un braccio robotico che raggiunge un nastro trasportatore, afferra un utensile, lo utilizza sul pezzo in costruzione, lo rimette sul nastro, afferra l'utensile successivo e così via: come accade nelle fabbriche automatizzate dei nostri giorni.

Ora rimpicciolite mentalmente l'intero meccanismo, compreso il nastro trasportatore, fino al livello molecolare, per formare l'immagine di un sistema di costruzione a nanoscala. Data una varietà sufficiente di utensili, questo sistema sarebbe un dispositivo di costruzione tuttofare, detto «assemblatore». In linea di principio, potrebbe costruire pressoché qualsiasi cosa, comprese copie di se stesso.

La nanotecnologia molecolare nel suo complesso non dipende dalla fattibilità di questa particolare proposta: un insieme di sistemi di costruzione meno generali potrebbe svolgere i compiti che abbiamo descritto. Ma poiché l'idea dell'assemblatore fa ancora discutere, vale la pena di citare le obiezioni sollevate.

Un eminente chimico, a un recente evento organizzato dalla American Association for the Advancement of Science, chiese come fosse possibile alimentare e dirigere un assemblatore e se esso fosse veramente in grado di rompere e riformare legami molecolari forti. Queste sono domande ragionevoli, a cui si può rispondere solo descrivendo progetti e calcoli troppo lunghi per essere esposti in questo articolo. Fortunatamente, letteratura tecnica sulle nanotecnologie che fornisce risposte apparentemente adeguate è disponibile almeno fin dal 1992, quando fu pubblicato il mio libro *Nanosystems*.

Un altro chimico di grande fama obietta che un assemblatore avrebbe bisogno di 10 «dita» robotiche per svolgere le proprie operazioni e che non c'è abbastanza spazio per tutte. Il bisogno di un numero così grande di manipolatori, tuttavia, non è mai stato accertato o anche solo seriamente discusso. Al contrario, i progetti che sono stati studiati più approfonditamente (e hanno ricevuto approvazione) usano uno strumento per volta e afferrano direttamente gli utensili, senza usare alcun «dito».

Questi esempi illustrano la difficoltà di valutare in modo del tutto adeguato i progetti di nanotecnologia. Molti di coloro che hanno fatto commenti non sono veramente esperti in questo settore: sono ottimi ricercatori nella propria disciplina, ma con poca esperienza nell'ingegneria dei sistemi. La carenza di ingegneri di sistemi molecolari sarà probabilmente un fattore limitante nella velocità di sviluppo della nanotecnologia.

È importante che le critiche alla nanotecnologia siano corrette, perché da esse dipendono decisioni vitali a livello di società. Se la nanotecnologia molecolare come è qui descritta è possibile, allora molti problemi cruciali potranno assumere risvolti radicalmente diversi. Oggi si ritiene per lo più che il riscaldamento globale sarà difficile da alleviare; con la nanotecnologia, però, l'eccesso di gas-serra potrà essere rimosso dall'atmosfera in modo economico. Ancora, secondo le previsioni attuali, vi sarà un numero crescente di cittadini anziani in cattive condizioni di salute; con la nanotecnologia medica avanzata, gli anziani di domani potrebbero essere invece più attivi e sani di quanto non siano oggi.

Allo stesso modo, è necessario concentrarsi ora sulla possibilità di incidenti e di abusi di questa potente tecnologia. È stato fatto molto lavoro sul problema di come evitare gravi incidenti correlati alla nanotecnologia. Sul Web sono disponibili le Foresight Guidelines, che delineano le norme di sicurezza finora proposte.

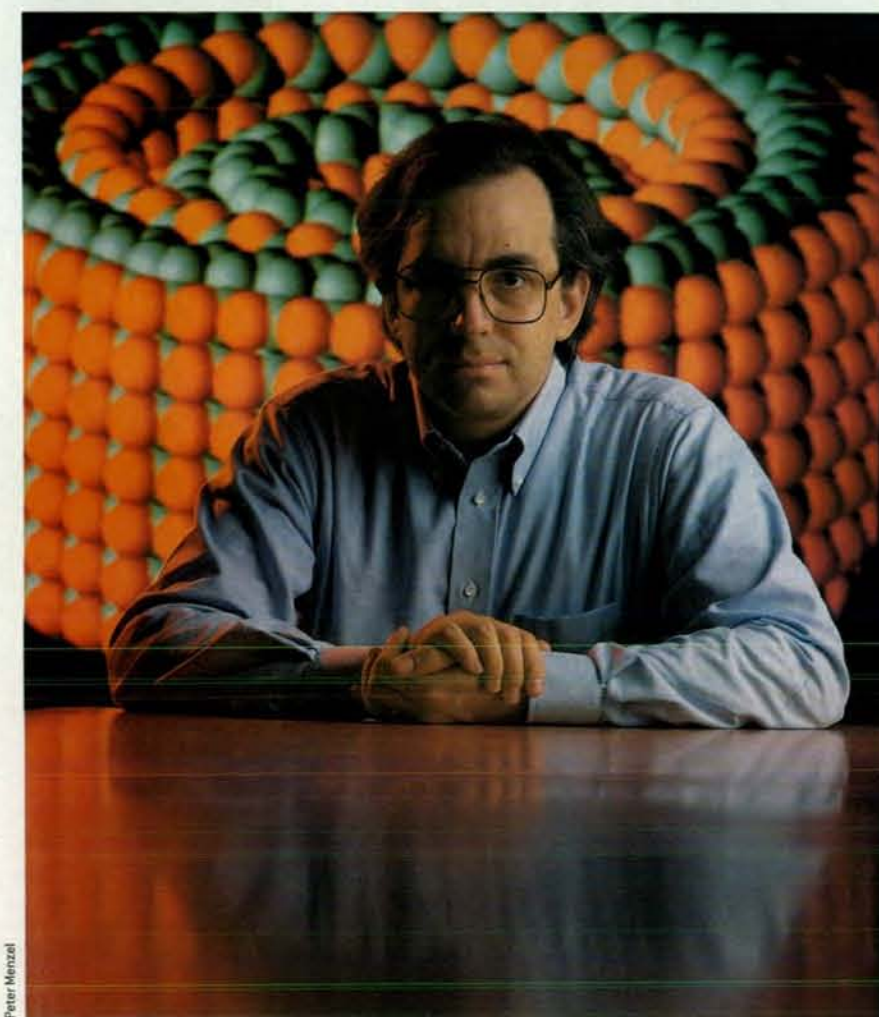
Ma la sfida di prevenire abusi - come lo sfruttamento di questa tecnologia da parte di governi aggressivi, gruppi terroristici o anche singoli individui - si prospetta ancora enorme. La più vicina analogia attuale del problema è la difficoltà di controllare le armi chimiche e biologiche. Il progresso verso la nanotecnologia molecolare pone in primo piano l'urgenza di trovare modi per gestire tecnologie che sono potenti, valide e aperte ad abusi.

L'AUTORE

K. ERIC DREXLER è presidente del Foresight Institute e ricercatore dell'Institute for Molecular Manufacturing; è autore di *Engines of Creation* e di *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation*.

Peter Menzel

K. ERIC DREXLER è stato fra i primi a ideare il concetto di sistemi di macchine molecolari (un componente di una di esse è visibile sullo sfondo).

di Richard Smalley

Chimica, amore e nanorobot

Quando vedremo i robot su scala nanometrica prefigurati da K. Eric Drexler e dagli altri nanotecnologi molecolari? Probabilmente mai

Quando un ragazzo e una ragazza si innamorano, si dice talvolta che tra di loro c'è una buona affinità «chimica». Questo riferimento alla chimica in tema di relazioni umane rispecchia in qualche modo ciò che accade quando ad accoppiarsi sono le molecole. In una reazione chimica fra due molecole «consenzienti» si formano legami tra alcuni degli atomi, nel corso di una complessa danza che implica moti in varie direzioni. Ma due molecole qualsiasi non reagiscono sempre e comunque: devono essere adatte l'una all'altra. E se la chimica è davvero buona, le molecole che reagiscono danno tutte origine all'esatto prodotto desiderato.

Nel cuore di una tipica reazione chimica non si muovono solo quegli specifici atomi che devono formare i nuovi legami, ma anche tutti quelli a cui essi sono legati e quelli a loro volta uniti a questi ultimi. Tutti questi atomi si devono comportare in un modo ben preciso per assicurare che il risultato della reazione sia quello desiderato. In una normale reazione chimica, da 5 a 15 atomi vicini al sito di reazione intraprendono un intricato valzer tridimensionale che si svolge in una regione di spazio non più grande di un nanometro.

In anni recenti, è diventato di moda immaginare minuscoli robot (talvolta chiamati «assemblatori») in grado di manipolare e costruire oggetti atomo per atomo. Considerate un singolo assemblatore: lavorando alacremente, questo ipotetico nanorobot costruirebbe molti nuovi legami via via che procede nel suo compito, posizionando nella struttura desiderata forse anche un miliardo di nuovi atomi al secondo. Ma per quanto sia veloce, questo ritmo sarebbe pressoché inutile per far funzionare una nanofabbrica: per generare anche una minuscola quantità di prodotto il nanorobot solitario impiegherebbe milioni di anni. (Per ottenere una mole di una sostanza occorrerebbero almeno 6×10^{23} legami, uno per ciascun atomo. Al notevole ritmo di 10^9 atomi al secondo, questo robot avrebbe bisogno di 6×10^{14} secondi - cioè 10^{13} minuti, pari a $6{,}9 \times 10^9$ giorni, ovvero 19 milioni di anni - per sintetizzare una mole di prodotto.) Un singolo nanorobot assemblatore sarebbe senza dubbio molto interessante scientificamente, ma non potrebbe fare molto nel mondo macroscopico «reale».

Immaginate però che questo nanorobot sia così versatile da poter costruire qualsiasi cosa, ammesso di disporre di una scorta del tipo appropriato di atomi, di una sorgente di energia e di istruzioni che descrivono che cosa costruire. Potremmo scrivere queste istruzioni dettagliate al calcolatore e poi inviarle al nanorobot via radio. Se il nanorobot potesse veramente costruire qualsiasi cosa, potrebbe certamente produrre una nuova copia di se stesso e quindi autoreplicarsi, così come fanno le cellule viventi. Dopo un po', avremmo un secondo assemblatore; dopo qualche tempo ancora, quattro, poi otto, poi sedici e così via.

Supponiamo ora che ogni nanorobot consista di un miliardo di atomi (10^9 atomi) disposti in una struttura incredibilmente elaborata. Se questi nanorobot potessero lavorare al ritmo di un miliardo di atomi al secondo immaginato prima, un nanorobot impiegherebbe solo un secondo per fare una copia di se stesso. I nuovi nanorobot cloni verrebbero poi programmati in modo da replicarsi a loro volta. Dopo circa 60 secondi di questa clonazione a raffica, ci sarebbero 2^{60} nanorobot, che è l'incredibilmente grande cifra di 10^{18} ovvero un miliardo di miliardi. Questo enorme numero di nanorobot sarebbe in grado di sintetizzare 53 chilogrammi al secondo di prodotto finito. Ora stiamo parlando di qualche cosa di concreto!

I nanorobot in generale non sono quindi terribilmente interessanti come metodo per costruire qualcosa in grandissima serie, ma lo diventano molto di più se hanno la capacità di autoreplicarsi. Se i nanorobot autoreplicanti fossero fattibili, allora il concetto di una macchina capace di costruire qualsiasi cosa, da un lettore di CD fino a un grattacielo, in un tempo notevolmente breve non sarebbe più così impossibile.

Le dita del nanorobot autoreplicante **non sarebbero solo troppo grosse** ma anche troppo appiccicose

Ma questi nanorobot autoreplicanti possono anche fare molta paura. Chi li controllerà? Come possiamo essere sicuri che qualche scienziato o *hacker* non ne progetterà uno veramente autonomo, che trasporti una serie completa di istruzioni per se stesso? Per quanto ne sappiamo, questi nanorobot potrebbero mutare, e alcuni mutanti potrebbero sviluppare la capacità, come le cellule tumorali, di ignorare qualsiasi segnale che ne dovrebbe indurre l'autodistruzione. Come potremmo fermarli una volta che avessero raggiunto questo stato maligno? I nanorobot autoreplicanti sarebbero equivalenti a una nuova forma di vita parassitaria, e potrebbe essere impossibile impedir loro di espandersi indefinitamente fino a inghiottire tutto ciò che si trova sulla Terra. Ancora più spaventoso, essi potrebbero progettare o acquisire, tramite mutazioni casuali, la capacità di comunicare fra di loro; forse formerebbero gruppi, costituendo un sistema nervoso primitivo. Forse diventerebbero «vivi» in ogni senso del termine. Poi, secondo le memorabili parole di Bill Joy, direttore scientifico della Sun Microsystems, che ha espresso preoccupazioni sulla stampa per le implicazioni sociali della proliferazione dei nanorobot, il futuro semplicemente non avrebbe bisogno di noi.

Ma quanto è realistica l'idea di un nanorobot autoreplicante? Pensiamoci. Gli atomi sono minuscoli e si muovono in modo definito e circoscritto: un chimico direbbe che cercano di minimizzare l'energia libera nel loro intorno. La «colla» elettronica che li unisce gli uni agli altri non è limitata a ciascun legame, ma è sensibile alla posizione esatta e all'identità di tutti gli atomi nelle immediate vicinanze. Così, quando il braccio nanomanipolatore del nostro nanorobot afferra un atomo e va a inserirlo nel posto desiderato, incontra un problema fondamentale: deve in qualche modo controllare non solo questo atomo, ma tutti gli altri esistenti nella regione. Non è un problema, si può dire; il nostro nanorobot può disporre di un braccio manipolatore aggiuntivo per ognuno di questi atomi; così avrebbe il controllo di tutto ciò che succede nel sito di reazione.

Ma non dimenticate: questa regione dove le reazioni chimiche devono essere controllate dal nanorobot è molto, molto piccola: appena un nanometro di lato. Questa limitazione causa almeno due difficoltà. La prima è che le dita di un braccio manipolatore devono essere a loro volta fatte di atomi, e hanno quindi una certa dimensione che non può essere ridotta. Semplicemente non c'è abbastanza spazio nella zona di reazione per tutte le dita che sarebbero necessarie al manipolatore per avere un controllo completo. In una famosa conferenza del 1959, che ispirò i nanotecnologi, il premio Nobel Richard Feynman disse «c'è un sacco di spazio in fondo»; ma in realtà non ce n'è «*così* tanto».

Le dita manipolatrici dell'ipotetico nanorobot autoreplicante non sarebbero solo troppo grosse, ma anche troppo appiccicose: gli atomi delle mani manipolatrici aderirebbero agli atomi che devono essere spostati. Così, sarebbe spesso impossibile posizionare questi minuscoli mattoni esattamente al posto giusto.

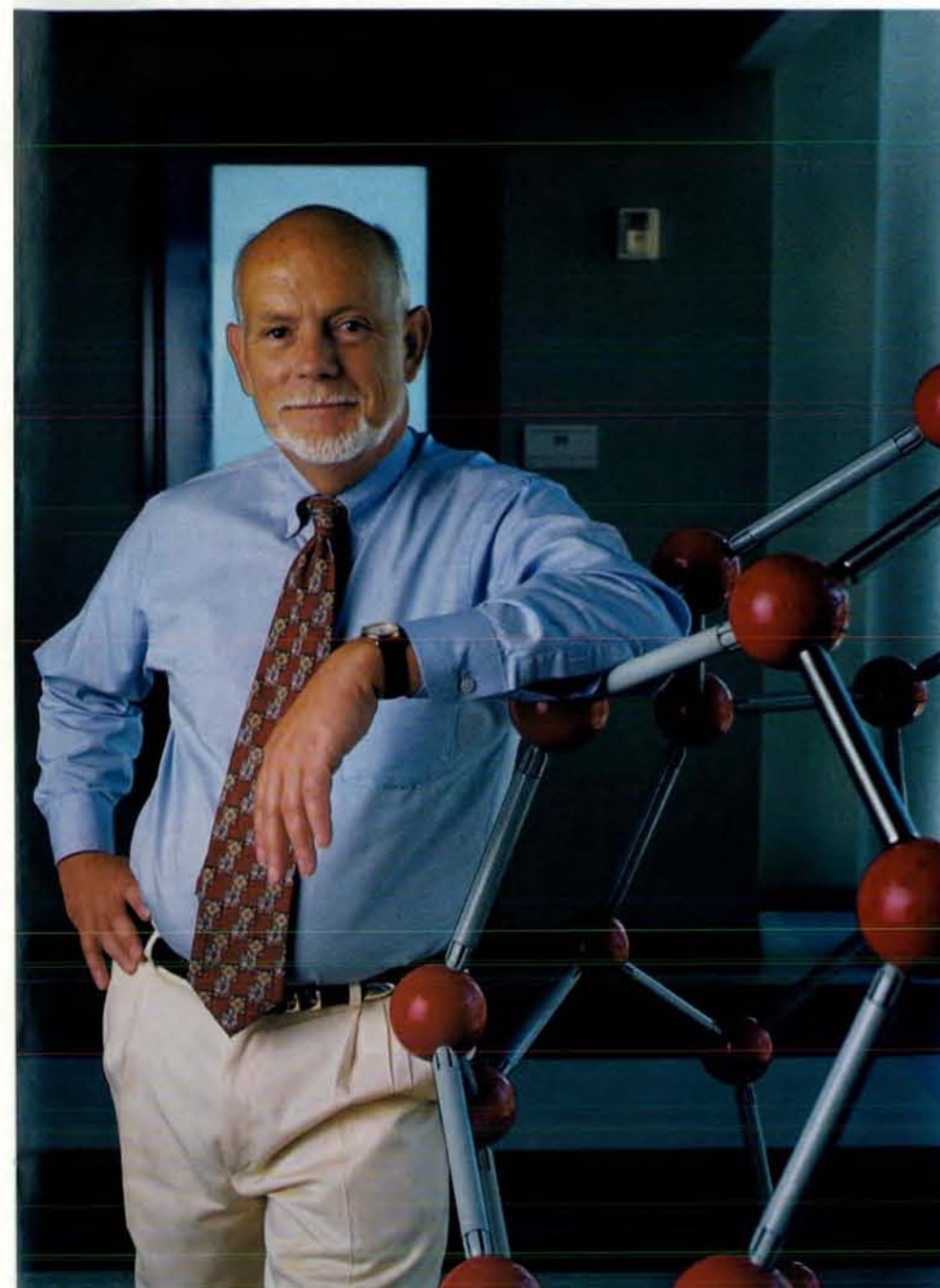
Entrambi i problemi sono fondamentali e quindi non possono essere aggirati in alcun modo. I nanorobot autoreplicanti sono impossibili nel nostro mondo. Per collocare tutti gli atomi al loro posto - la visione di alcuni nanotecnologi - sarebbero necessarie dita magiche. Un simile nanorobot non potrà mai diventare più di un sogno futuristico.

Pam Francis

RICHARD E. SMALLEY sostiene che i nanorobot autoreplicanti rimarranno pura fantasia.

L'AUTORE

RICHARD E. SMALLEY è «Gene and Norman Hackerman Professor» di chimica e fisica presso la Rice University. Nel 1996 ha ricevuto il premio Nobel per la chimica per la scoperta dei fullereni.

di Steven Ashley

Lavoro di squadra

I fautori delle nanotecnologie stanno scoprendo quanto sia difficile costruire minuscoli robot per curare malattie o eseguire processi produttivi non inquinanti

La fabbricazione molecolare - la stravagante idea secondo cui si può assemblare qualsiasi cosa, dai computer al caviale, partendo da singole molecole - cambierebbe il mondo, se solo qualcuno riuscisse a scoprire come farla funzionare. Immaginate i nanoassemblatori: squadre di lavoratori dotati di braccia robotiche manipolatrici, ognuna delle dimensioni di pochi nanometri. Controllati da un potente calcolatore, questi semplici dispositivi utilizzerebbero componenti molecolari per fare copie di se stessi; e queste macchine costruirebbero, a loro volta, altre nanomacchine, che ne creerebbero altre, e così via, con crescita esponenziale. Simili squadre di nanorobot costruttori sarebbero poi istruite a svolgere compiti quali curare malattie dall'interno dell'organismo e fabbricare complessi materiali progettati a tavolino partendo da materie prime comuni e a un costo straordinariamente basso.

Da anni, il futurologo K. Eric Drexler e il suo collega Ralph C. Merkle, esperto di crittografia, coltivano questa visione, usando simulazioni al calcolatore di ingranaggi a scala nanometrica, di manipolatori e di altri sottosistemi per macchine molecolari. In queste immagini, sfere colorate indicano la posizione di ciascun atomo. Molte analisi di queste elaborate simulazioni hanno indicato che esse semplicemente non funzionerebbero secondo le aspettative. Ma forse la critica più dura riguarda il fatto che esse sono mere rappresentazioni digitali e non oggetti del mondo reale che interagiscono con complesse forze di legame chimico nell'ambiente a scala nanometrica, dove la fisica macroscopica non è sempre applicabile e spesso prevale la meccanica quantistica.

Poi, nel 1999, Merkle ha deciso di lasciare il suo lavoro al Palo Alto Research Center della Xerox per tentare di dare concretezza alle sue costruzioni al calcolatore. Si è così unito al magnate del software James R. Von Ehr II, un ammiratore delle idee di Drexler, che ha deciso di investire parte del patrimonio a nove cifre che aveva ricavato vendendo la sua società, la Altsys, per fondare la prima compagnia di nanotecnologia molecolare.

Zyvex, questo il nome della società fondata da Von Ehr, mira molto in alto. «Vorremmo essere la Applied Materials per l'industria mondiale» dice, riferendosi ai principali produttori al mondo di dispositivi a semiconduttori. Ma la sua società di nanotecnologia molecolare è ancora ai primi passi. L'esperienza ha già dimostrato quanto sia difficile passare da macchine molecolari create al calcolatore a nanoassemblatori reali. Uno dei primi compromessi è stato la rinuncia all'idea di costruire oggetti atomo per atomo. Oggi l'obiettivo a lungo termine è quello di realizzare sistemi di macchine a nanoscala partendo da grandi molecole o da blocchi di molecole. A questo scopo, gli scienziati della società hanno adottato un approccio dal basso verso l'alto, imparando a comporre strutture una molecola alla volta usando microscopi a forza atomica e dispositivi analoghi.

A breve termine, i ricercatori della Zyvex stanno mettendo a punto sistemi microelettromeccanici (MEMS), con strutture dell'ordine delle decine di micrometri. I dispositivi MEMS vengono prodotti «dall'alto verso il basso», tracciandoli tramite litografia e poi incidendoli su un substrato di silicio o di altro materiale.

Richard Feynman, il primo *guru* di questo settore, disse che macchine grandi potrebbero essere usate per costruire macchine più piccole: ed è qui che entrano in scena i MEMS. Secondo Merkle, i metodi di fabbricazione dei MEMS potrebbero essere adottati per costruire bracci assemblatori robotici. Queste «mani» microelettromeccaniche potrebbero assemblare mani submicrometriche che a loro volta costruirebbero mani ancora più piccole, e così via, un passo dopo l'altro, fino alle più piccole dimensioni raggiungibili: il nanoassemblatore, un dispositivo di fabbricazione a scala nanometrica. Per raggiungere lo scopo, la Zyvex dovrà ridurre i suoi attuali robot MEMS di un fattore 1000 circa. Una volta realizzata questa riduzione, i nanorobot verrebbero destinati a «costruzioni a precisione atomica» per produrre pressoché qualsiasi cosa. Costruttori universali potrebbero realizzare un orologio Rolex, seguito poche ore dopo da un calcolatore a terabit e poi da una pillola robotica per curare una malattia.

Due idee sono alla base della strada della Zyvex verso la nanorobotica, come

spiega Merkle. Nel cosiddetto assemblaggio di posizione, i manipolatori meccanici afferrano e sistemano con precisione gli oggetti nel prodotto finale. Un controllo posizionale a scale di decine di nanometri significa spostare grandi molecole o blocchi di molecole dove si vuole e far sì che si leghino in maniera appropriata al prodotto in fase di montaggio.

Una macchina in grado di costruire un materiale complesso o un dispositivo dal basso - usando una serie di molecole o di gruppi di molecole come componenti - richiederà un'altra tecnologia critica: la macchina dovrà essere capace di costruire una copia di se stessa. «Per raggiungere una produzione economicamente vantaggiosa di dispositivi molecolari in grande numero, è necessaria qualche forma di autoreplicazione» spiega Merkle. E a meno di non disporre di orde di nanocostruttori, realizzare oggetti macroscopici una molecola alla volta richiederebbe un tempo veramente lungo. I ricercatori della Zyvex fanno notare che per costruire un assemblatore non sarebbe necessaria una macchina completamente autoreplicante. Comunque, il compito è monumentale: qualsiasi macchina non biologica in grado di costruire un numero qualunque di repliche di se stessa frutterebbe come minimo un premio Nobel.

Ma allora, come pensa la Zyvex di realizzare l'assemblatore? Recentemente la società si è unita alla Standard MEMS di Burlington, nel Massachusetts - che produce microsistemi - in un programma di collaborazione biennale per realizzare tramite litografia bracci manipolatori e pinze per assemblare dispositivi di fabbricazione più piccoli a partire da una «tavolozza» di parti «attive» posizionate su wafer di silicio. «Se la precisione nel posizionamento è abbastanza buona, il braccio deve semplicemente abbassarsi e afferrare il pezzo. Non c'è bisogno di un sistema elaborato di sensori» dice Merkle.

Secondo Von Ehr, i ricercatori della Zyvex hanno messo a punto un metodo con il quale i manipolatori MEMS possono staccare le parti da un substrato in modo che siano pronte per il microassemblaggio usando connettori autocentranti: un utile stratagemma, anche se non proprio nuovo. Le parti del manipolatore verrebbero create litograficamente, incise e poi separate dal substrato, in modo da potere essere afferrate dal manipolatore MEMS. Von Ehr spera che questi manipolatori MEMS svolgeranno il ruolo di tecnologia intermedia, che possa essere sfruttata commercialmente - per esempio per costruire dispositivi per l'allineamento dei cavi a fibre ottiche - via via che la società proseguirà verso la nanotecnologia molecolare.

Il guaio è che è difficile trovare qualcuno nel campo dei MEMS che sia interessato a questo tipo di tecnologia o che riesca a immaginare quali prodotti essa possa realmente costruire, come dice Kaigham J. Gabriel, professore di ingegneria elettronica, informatica e robotica alla Carnegie Mellon University ed ex direttore del programma MEMS presso la Defense Advanced Research Projects Agency.

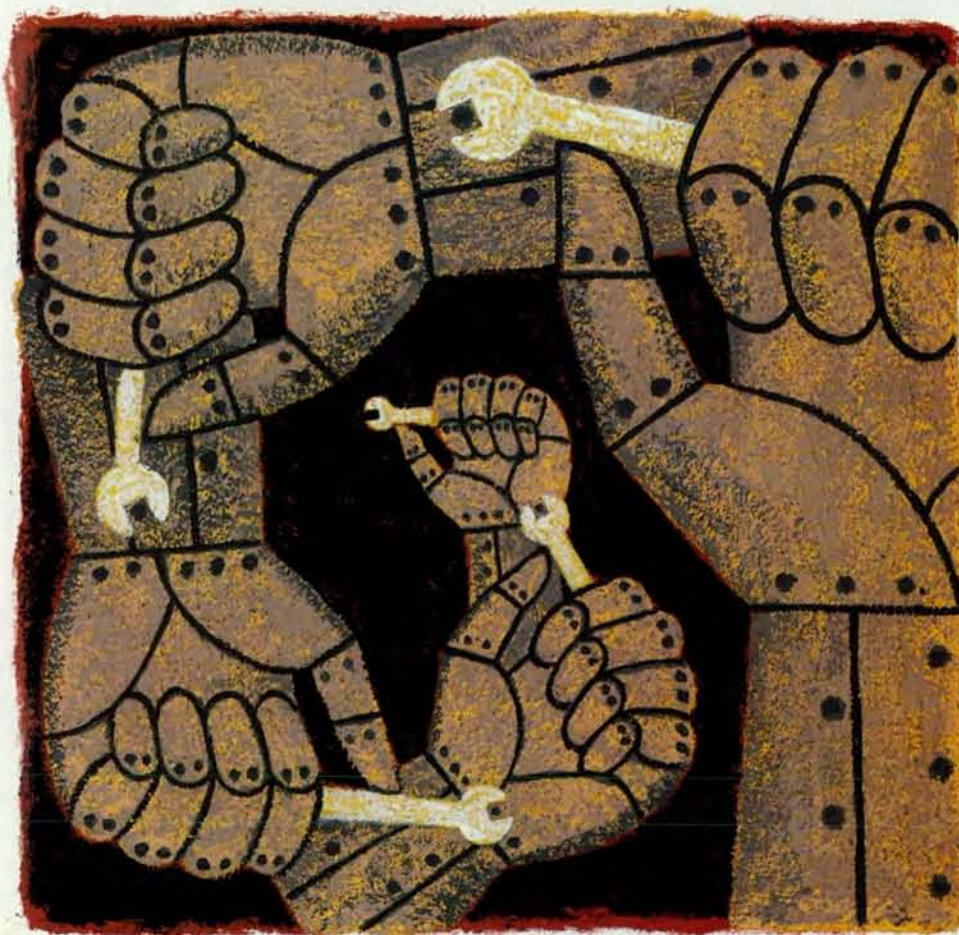
E che dire di un assemblatore a nanoscala? «Non è chiaro quanto tempo ci vorrà per realizzare il controllo finale a livello molecolare» ammette Merkle: «potrebbero volerci 10 o 20 anni».

Così la Zyvex sa già quale sarà il suo lavoro per i prossimi anni; tuttavia essa ha dato inizio a un piano che è il nanoequivalente di uno sbarco sulla Luna in relativo isolamento e con uno staff di sole 37 persone. In generale, la comunità scientifica ha preso le distanze da questo progetto. Molti importanti scienziati che lavorano nel campo delle nanotecnologie non prendono sul serio i progetti della Zyvex, ma hanno chiesto di rimanere anonimi per non essere inondati dalle proteste degli entusiasti delle nanotecnologie. Dice un noto ricercatore: «Non abbiamo visto alcuna prova sperimentale che anche solo una parte del loro programma possa venire realizzata. Pensiamo che sia un cumulo di assurdità». Merkle ribatte che «nulla di ciò che proponiamo contraddice le leggi della fisica».

Nel frattempo, con il patrimonio di Von Ehr che sostiene la ricerca, la Zyvex può continuare a lavorare ancora per molti anni senza dover piazzare prodotti sul mercato, ma l'imprenditore ammette che non sarebbe male fare un po' di soldi. «L'intera faccenda è molto più difficile di quanto non apparisse all'inizio» ammette Von Ehr, che ha già speso 20 milioni di dollari nel progetto.

Ma date le difficoltà tecniche e l'attesa di 10 o 20 anni per un eventuale successo, ci si chiede chi possa voler investire denaro in un progetto del genere. Dare l'assalto ai mulini a vento con i propri soldi è un conto, ma la pressione aumenta notevolmente quando sono in gioco i quattrini altrui.

James Steinberg

LA TECNOLOGIA MOLECOLARE è perseguita scendendo a scale sempre più piccole.

Psoriasi

malattia comune dalle cause sconosciute

LA FOTOTERAPIA con raggi UV-A e UV-B, effettuata con frequenza bi- o trisettimanale presso centri specializzati, può dare ottimi risultati nelle forme lievi di psoriasi.

Leif Skoogfors/CORBIS/Grazia Neri

Suscettibilità genetica e fattori ambientali possono contribuire allo scatenamento di questa patologia cronica, per la quale per ora non esistono terapie risolutive

di Francesca Capon e Giuseppe Novelli

Nel terzo libro della Bibbia, il *Levitico*, sono fornite istruzioni particolareggiate su come comportarsi in presenza di impurità della pelle. Nel XIII capitolo si legge: «Se sulla calvizie del cranio o della fronte appare una piaga bianca tendente al rosso, è lebbra. Il lebbroso colpito dalla lebbra porterà vesti strappate e il capo scoperto, si coprirà la barba e andrà gridando: Immondo! Immondo! Sarà immondo finché avrà la piaga; e, immondo, se ne starà solo, abiterà fuori dell'accampamento». Nell'Antico Testamento, il termine «lebbra» indica in senso generico una serie di affezioni cutanee. Nel caso specifico, la descrizione della piaga fa pensare alla psoriasi, una malattia della pelle che è ancora oggi estremamente comune. Talmente comune che in Internet esistono diversi forum in cui le persone colpite dalla malattia si scambiano messaggi e consigli. Quasi 3000 anni dopo la stesura del *Levitico*, Angie, un'adolescente americana malata di psoriasi si sfoga così: «Qui in Florida d'estate si muore di caldo, ma io porto sempre magliette a maniche lunghe e pantaloni lunghi. Mi vergogno di far vedere anche un solo centimetro della mia pelle malata».

IN PILLOLE

- La psoriasi è una malattia cronica dovuta a una disfunzione del sistema immunitario che, nella cute, provoca infiammazione e desquamazione delle cellule e, nelle articolazioni, una particolare forma di artrite.
- Studi sulle famiglie di pazienti affetti hanno dimostrato che sui cromosomi 1, 6 e 17 esistono loci genici che conferiscono suscettibilità alla malattia. Questa predisposizione, unita a fattori ambientali scatenanti, è quasi sicuramente la responsabile della malattia.
- Conoscendo i geni della suscettibilità e quindi le proteine che essi codificano sarà più facile preparare farmaci mirati ed evitare agli individui predisposti l'esposizione a fattori ambientali che scatenino la malattia.

RITRATTO DI UN PAZIENTE AFFETTO DA PSORIASI. L'immagine è contenuta in un atlante dermatologico del secolo scorso. (Cortesia G. Fabrizi, Roma)

Angie non è la sola ad avere problemi del genere: nel XXI secolo la convivenza con la malattia è ancora difficile per la maggior parte delle persone affette. La psoriasi è infatti una patologia cronica: i sintomi possono scomparire per alcuni periodi, ma non esiste oggi una cura che possa assicurare una guarigione definitiva. In realtà sappiamo ancora troppo poco sulle cause di questa malattia per progettare terapie risolutive.

Le ricerche degli ultimi anni indicano che la psoriasi dipende fondamentalmente da una disfunzione del sistema immunitario. Nelle persone affette, un'anomala attività dei linfociti T (un sottotipo di globuli bianchi) causa infiammazione della pelle e una proliferazione eccessiva delle cellule che la compongono (*si veda la finestra a pagina 66*). La desquamazione di tali cellule provoca prurito e a volte dolore. Nelle giunture, il processo di infiammazione può condurre all'insorgenza di una particolare forma di artrite, l'artrite psoriasica. Questa forma di artrite è molto simile all'artrite reumatoide e può essere ugualmente invalidante, sebbene nel siero non sia presente il fattore reumatoide.

Circa il 2-4 per cento della popolazione caucasica - quella a cui apparteniamo noi europei - è colpito dalla psoriasi; l'incidenza è decisamente minore nella popolazione nera. Di solito, la malattia colpisce fra i 10 e i 40 anni, ma può presentarsi a ogni età. L'inizio è per lo più graduale. La psoriasi generalmente colpisce il cuoio capelluto, le superfici estensorie degli arti (soprattutto gomiti e ginocchia), la zona sacrale, i glutei e il pene. Le unghie, le sopracciglia, la regione ombelicale, le ascelle, la regione ano-genitale possono anch'esse essere coinvolte. In alcuni casi la dermatosi può assumere un carattere generalizzato.

Una malattia genetica, ma non solo

È ormai noto da tempo che circa un terzo dei pazienti con psoriasi ha almeno un parente stretto (padre, madre, fratello o sorella) affetto dalla malattia. Ciò suggerisce che la psoriasi abbia una componente genetica. I primi studi approfonditi in materia risalgono agli anni sessanta e si devono al lavoro pionieristico di alcuni medici scandinavi. Nel 1963, Gunnar Lomholt portò a termine un importante studio sugli abitanti delle isole Faeröer (un piccolo arcipelago al largo della Danimarca). Dalle sue ricerche emerse in maniera chiara che i familiari dei pazienti avevano una maggiore probabilità di contrarre la malattia, rispetto agli altri membri della popolazione. A questo proposito, i dati di Lomholt sono piuttosto interessanti: per una persona che ha un fratello affetto, il rischio di ammalarsi a sua volta è circa del 12 per cento; se oltre al fratello è affetto anche un genitore, il rischio arriva al 35 per cento.

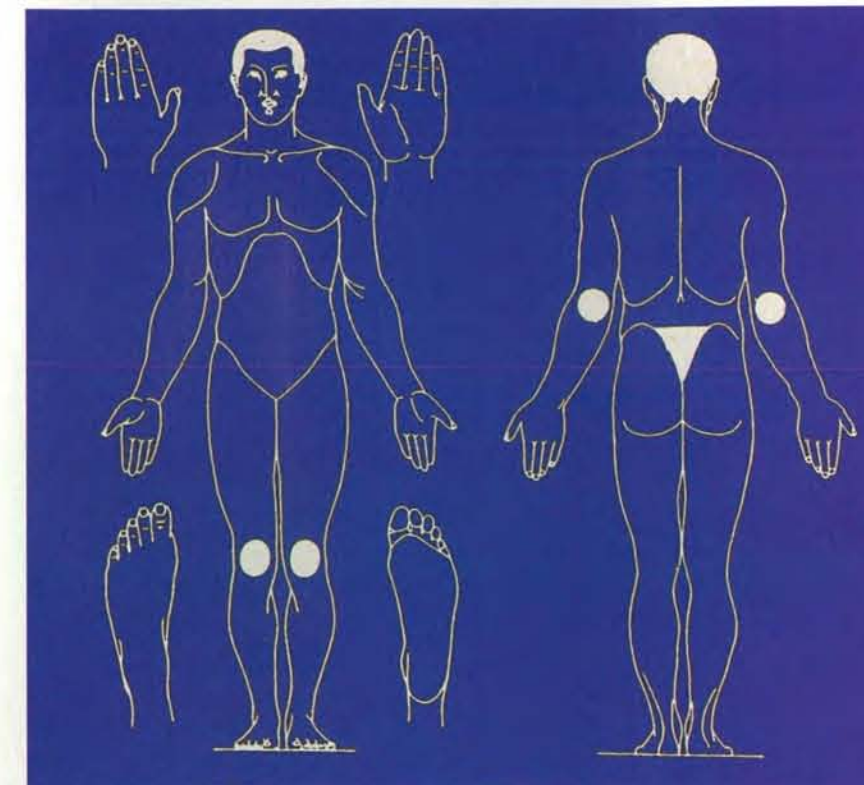
Un'ulteriore conferma dell'esistenza di una componente genetica della malattia è venuta da un secondo filone di studi: l'analisi di coppie di gemelli. Il principio alla base di questo tipo di studi è piuttosto semplice: i gemelli monozigoti sono geneticamente identici, a differenza dei gemelli dizigoti che, dal punto di vista genetico, equivalgono a una coppia di fratelli. Se un dato carattere ha una componente genetica, ci aspettiamo che i gemelli monozigoti tendano a essere concordanti tra di loro per quel tratto. D'altra parte i gemelli dizigoti che sono geneticamente simili, ma non identici, saranno meno frequentemente concordanti per caratteri che sono geneticamente determinati. Seguendo questo principio, nel 1974 Eugene Farber e i suoi collaboratori esaminarono i fratelli gemelli di 61 pazienti con psoriasi. Risultò che 41 soggetti avevano un gemello monozigote il quale in 30 casi era anch'esso affetto. Venti soggetti avevano un gemello dizigote che solo in quattro casi era affetto. Quindi lo studio di Farber, che fu ampiamente confermato da una serie di ricerche successive, contribuì in maniera significativa a dimostrare l'esistenza di una base genetica della psoriasi.

D'altra parte, è altrettanto risaputo che alcuni fattori ambientali possono provocare la comparsa dei sintomi della malattia. Per tale motivo la psoriasi è considerata una malattia multifattoriale. Il termine viene usato per tutte le patologie che non sono provocate unicamente da fattori ambientali (come un'infezione virale) o genetici (come l'anemia mediterranea), ma da una loro interazione. In altre parole, le malattie multifattoriali sono provocate da fattori ambientali scatenanti, che però esercitano la loro azione solo su individui geneticamente vulnerabili. I dati di cui oggi disponiamo ci portano a ritenere che questa suscettibilità alla malattia dipenda dall'azione combinata di più geni, per cui l'eredità della psoriasi è definita poligenica.

Lo studio delle famiglie

La psoriasi rappresenta quindi un modello piuttosto complesso da studiare, anche perché esistono molte variabili ancora poco conosciute. Non sappiamo, per esempio, quanti siano i geni che contribuiscono alla suscettibilità alla malattia, né siamo sicuri che la combinazione presente negli individui affetti sia una soltanto. Non possiamo neppure escludere che la malattia chiamata psoriasi corrisponda in realtà a una serie di patologie geneticamente diverse (cioè causate da diversi gruppi di geni), che siamo incapaci di distinguere. D'altra parte, la diffusione e i costi sociali della psoriasi sono elevati e i benefici derivanti da una migliore comprensione delle basi genetiche della malattia sarebbero rilevanti.

Vale la pena sottolineare come queste considerazioni non valgano solo per la psoriasi, ma si applichino anche a numerose malattie comuni. Diabete, obesità, morbo di Parkinson e di Alzheimer sono solo alcuni esempi di patologie molto diffuse che condizionano pesantemente la qualità della vita di milioni di persone. Analogamente alla psoriasi, queste malattie mostrano tutte un'eredità di tipo multifattoriale. D'altra parte, la complessità delle loro basi genetiche ha a lungo scoraggiato ogni approccio sperimentale.

Questa situazione di stallo si è gradualmente sbloccata solo a

LE ZONE DEL CORPO maggiormente colpite dalla psoriasi sono cuoio capelluto, gomiti, ginocchia, zona sacrale, glutei e pene. Meno frequentemente, possono essere coinvolti anche i palmi delle mani e le piante dei piedi, le unghie, le sopracciglia e le regioni ombelicale e ano-genitale. Nelle giunture si può instaurare l'artrite psoriasica.

GLI AUTORI

FRANCESCA CAPON, ricercatrice al Dipartimento di biopatologia e diagnostica per immagini dell'Università di Roma «Tor Vergata», si è dedicata in particolare alla diagnosi genetica delle atrofie muscolari spinali, per la quale ha ideato un *kit*, e all'identificazione dei geni della suscettibilità alla psoriasi. GIUSEPPE NOVELLI, professore straordinario di genetica umana all'Università di Roma «Tor Vergata», dirige il Laboratorio di genetica medica del Policlinico. Le sue principali ricerche riguardano l'atrofia muscolare spinale, le basi molecolari della sindrome di Di George, la terapia genica della fibrosi cistica e la genetica della psoriasi.

Gli autori ringraziano il Ministero della Sanità, la Fondazione Telethon e l'ADIPSO per il contributo alle ricerche sulla psoriasi.

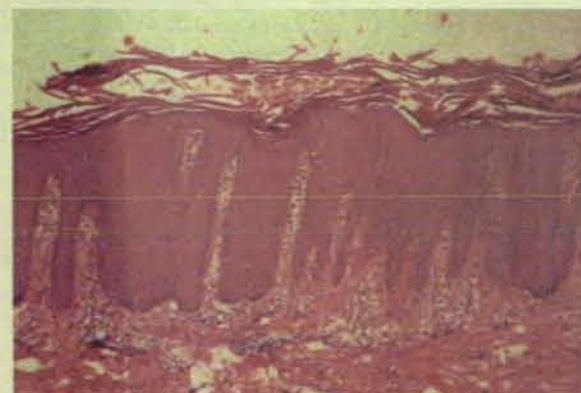
I numeri della psoriasi

2,5-5 milioni di persone sono affette da psoriasi negli USA; in Europa i casi stimati sono **6 -13 milioni**; in Italia **1 milione**.
200 000 nuovi casi diagnosticati ogni anno negli USA.
1,6 miliardi di dollari spesi ogni anno negli USA; **0,8-1,2** miliardi di lire la spesa annua stimata in Italia.

Tante cellule e mal **organizzate**

La psoriasi è caratterizzata da una alterazione infiammatoria dell'epidermide (*microfotografia in alto*) e del derma (*al centro*) che si manifesta con chiazze eritemato-squamose a limiti netti. La malattia può essere acuta o cronica (*in basso*) con tendenza a recidivare.

Nelle fasi precoci ▲ della malattia, le cellule mononucleate migrano dal derma all'epidermide dando alla pelle il caratteristico aspetto squamoso.

◀ Il dettaglio della papilla dermica qui a fianco mostra quello che avviene nella fase acuta: i capillari (*aree bianche*) si dilatano e da essi fuoriescono cellule polimorfonucleate che tendono ad accumularsi nell'epitelio.

▲ Nella fase cronica la pelle appare ispessita sia per l'afflusso di cellule infiammatorie provenienti dai vasi sanguigni, sia per l'eccessiva produzione di nuove cellule dell'epidermide.

UN TRATTAMENTO INSOLITO per migliorare l'aspetto della pelle affetta da psoriasi: immergersi nelle acque termali di Kangal, in Turchia, e lasciare «lavorare» i pesciolini che vivono in queste acque.

Chris Hellier/CORBIS/Grazia Neri

partire dai primi anni novanta, grazie al progredire delle tecnologie a disposizione dei genetisti. Così, la disponibilità di apparati sperimentali automatizzabili e di programmi per l'elaborazione dei dati sempre più sofisticati ha finalmente permesso di analizzare casistiche di pazienti sufficientemente estese. In questo modo, grazie all'integrazione tra competenze diverse, negli ultimi anni sono stati fatti significativi passi in avanti. Nel caso della psoriasi, si è riusciti a definire una localizzazione abbastanza precisa di alcuni dei geni che conferiscono suscettibilità alla malattia. In altre parole, non siamo ancora riusciti a isolare questi geni, ma sappiamo su quali cromosomi dobbiamo andare a cercarli. In particolare, sono state individuate due regioni sui cromosomi 6 e 17 che contengono sicuramente geni per la suscettibilità alla malattia. Una terza regione, sita sul cromosoma 1, è stata individuata in Italia, a Roma, grazie alla collaborazione tra i ricercatori dell'Università «Tor Vergata» e i dermatologi dell'Istituto dermatopatico dell'Immacolata e dell'Università Cattolica del Sacro Cuore.

L'ottenimento di questo risultato ha richiesto un notevole impegno da parte di tutti i centri coinvolti nella ricerca. In una prima fase, i dermatologi hanno selezionato dai loro archivi i nomi di una ventina di famiglie nelle quali fossero presenti almeno tre persone malate. Le famiglie in questione sono state contattate, nuovamente visitate e a tutti i soggetti affetti e ai loro genitori sono stati fatti prelievi di sangue. A questo punto, ha preso il via la fase sperimentale vera e propria. I ricercatori di Tor Vergata hanno isolato il DNA dai prelievi di sangue e hanno esaminato «palmo a palmo» i cromosomi dei pazienti, fino a individuare la regione del cromosoma 1.

L'individuazione di tre regioni di suscettibilità rappresenta un progresso importante. Peraltro, sia la regione sul cromosoma 6 sia quella sul cromosoma 1 contengono un gran numero di geni noti, che sono coinvolti nel differenziamento dell'epidermide o nel funzionamento del sistema immunitario. È quindi probabile che sia proprio la disfunzione di uno di questi geni a conferire suscettibilità alla psoriasi.

Individuare il gene in questione e riuscire a dimostrare il suo coinvolgimento nella malattia non è un'impresa semplice: quasi tutti i geni presenti in queste regioni risultano molto attivi nell'epidermide e parecchi di questi, come abbiamo recentemente dimostrato, addirittura iperattivi (10-100 volte i livelli normali di espressione) nella pelle dei pazienti con psoriasi. Abbiamo inoltre osservato che, in una buona parte delle famiglie italiane nelle quali la malattia è presente, i geni «critici» del cromosoma 6 e quelli del cromosoma 1 interagiscono tra loro attraverso un meccanismo ancora ignoto. La contemporanea presenza in un individuo di entrambi i gruppi di geni modifica sensibilmente il rischio di sviluppare la malattia.

Il futuro: farmaci mirati, prevenzione e terapia genica

Per quanto ambizioso, l'obiettivo di identificare i geni della suscettibilità alla psoriasi e ad altre patologie multifattoriali appare oggi finalmente realizzabile. Ma quali sono i vantaggi concreti che ci aspettiamo di ottenere da queste scoperte? La risposta più ovvia è che tanto più si conosce una malattia, tanto più si è in grado di curarla. Nel caso della psoriasi, la conoscenza dei geni per la suscettibilità e delle proteine che essi codificano potrebbe finalmente chiarire i meccanismi molecolari che sono alla base della malattia e consentirci di sviluppare farmaci con effetti mirati.

In realtà, l'isolamento dei geni per la suscettibilità potrebbe avere conseguenze ancora più rilevanti per un'opera di prevenzione. Diventerebbe infatti possibile identificare precocemente gli individui geneticamente suscettibili. Evitando a questi soggetti l'esposizione a fattori ambientali scatenanti, il loro rischio di contrarre la malattia potrebbe essere ridotto in maniera drastica. Le nuove tecnologie di terapia genica potrebbero inoltre venire facilmente applicate alla psoriasi in quanto, in questa malattia, il tessuto bersaglio (la pelle) è facilmente raggiungibile attraverso somministrazioni locali di «DNA terapeutico» nelle sedi di manifestazione della malattia. È quindi possibile che, entro qualche anno, le drastiche prescrizioni del *Levitico* perdano finalmente di attualità, divenendo obsolete e confinate solo alla curiosità intellettuale.

Un **solo** gene non è **abbastanza**

Mappa genetica (*in alto*) della regione del cromosoma 1 dove è localizzato il gene la cui mutazione è responsabile della psoriasi. Per rendere il soggetto più vulnerabile alla malattia occorre che più geni iperattivi a livello dell'epidermide (*in basso*) siano presenti simultaneamente in uno stesso individuo. Tutto questo però non è ancora sufficiente: la malattia si sviluppa quando intervengono determinate condizioni ambientali che agiscono come fattori scatenanti.

→ http://www.psoriasis.org
sito della National Psoriasis Foundation (USA)

→ http://www.adipso.it
sito dell'Associazione italiana per la difesa degli psoriasici

BIBLIOGRAFIA

CAPON F. e altri, *Searching for Psoriasis Susceptibility Genes in Italy: Genome Scan and Evidence for a New Locus on Chromosome 1* in «Journal of Investigative Dermatology», 112, pp. 32-35, 1999.

STRACHAN T. e READ A.P., *Complex Diseases: Theories and Results* in «Human Molecular Genetics», BIOS Scientific Publishers Ltd., 1999.

CAPON F., DALLAPICCOLA B. e NOVELLI G., *Advances in the Search for Psoriasis Susceptibility Genes* in «Molecular Genetics and Metabolism», 71, pp. 250-255, 2000.

SPIRITO F. e altri, *Cutaneous Gene Transfer and Therapy: the Present and the Future* in «The Journal of Gene Medicine», 3, pp. 321-331, 2001.

Una nicchia nella Galassia

Solo in una parte della Via Lattea vi sono condizioni adatte all'evoluzione di esseri viventi

di Guillermo Gonzalez, Donald Brownlee e Peter D. Ward

SU QUESTO POVERO PIANETA SEMBRA SIA ANDATO TUTTO STORTO. Bombardato da comete, sottoposto al calore intensissimo di una supernova vicina e sul punto di essere catapultato nello spazio da un incombente gigante gassoso, il pianeta deserto potrebbe in realtà essere un esempio più tipico dei piccoli corpi rocciosi della nostra galassia di quanto non sia la Terra.

Nei racconti di fantascienza, viaggiatori interstellari visitano luoghi esotici della Via Lattea e incontrano alieni affascinanti. Basta nominare un luogo, e sicuramente qualcuno ha già pensato di collocarvi una civiltà: il centro galattico, un ammasso globulare, una regione di formazione stellare, un sistema binario, una nana rossa. Il motivo per cui gli scrittori di fantascienza sono così creativi è che gli scienziati continuano a fare i guastafeste. Un tempo era perfettamente rispettabile inventare abitanti intelligenti della Luna, di Marte, di Venere, di Giove o persino del Sole, ma oggi i Marziani costruttori di canali o le oasi temperate nell'interno del Sole appaiono solo come idee bizzarre. E via via che gli scrittori si spingono più lontano nel collocare i loro personaggi, gli scienziati non restano indietro. Oggi i ricercatori considerano con scetticismo l'idea che la vita intelligente sia comune nella Via Lattea. Proprio come gran parte del sistema solare è ostile agli organismi pluricellulari, la stessa cosa potrebbe valere per gran parte della nostra galassia.

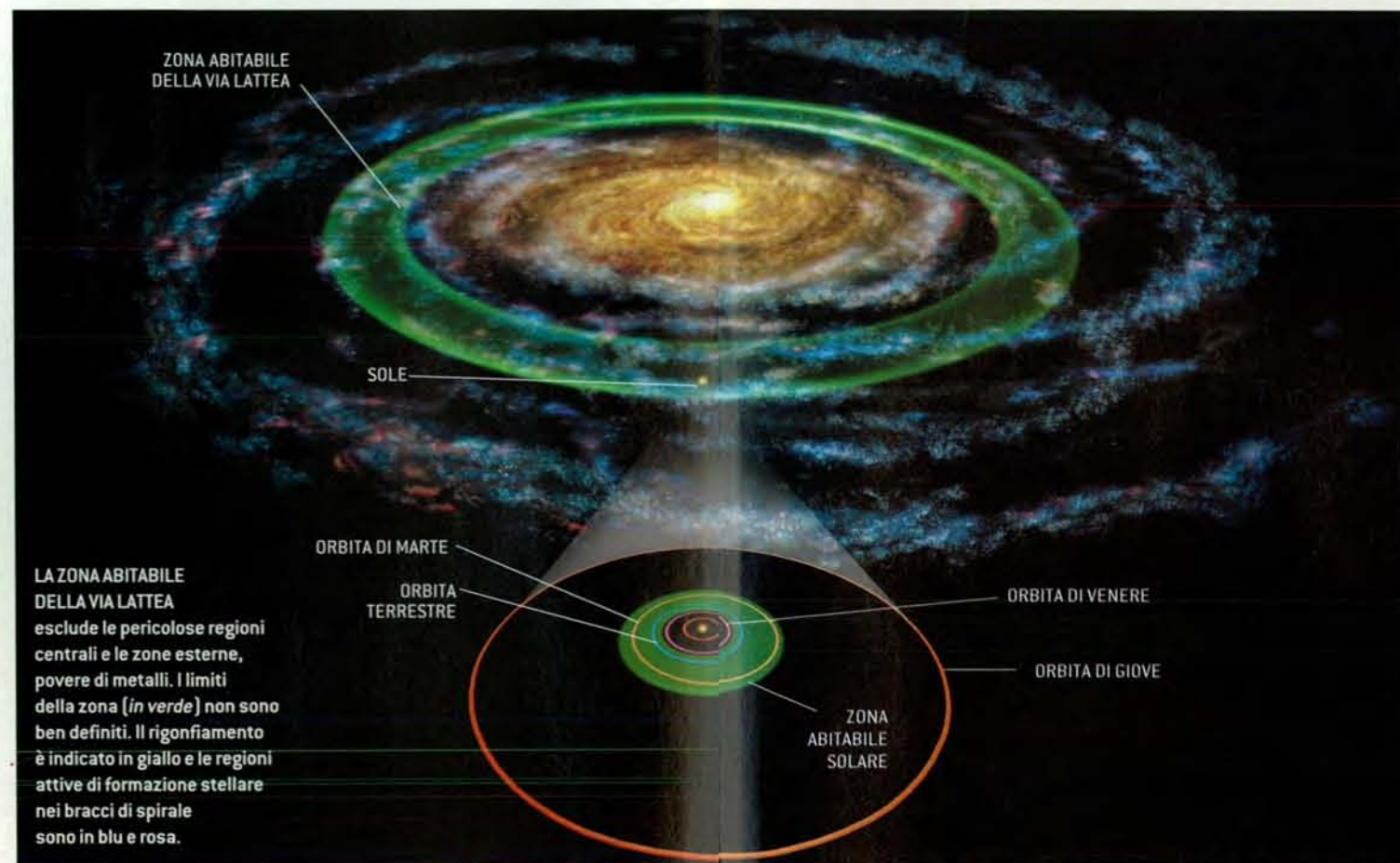
In un dato sistema planetario, gli astronomi definiscono la regione ottimale per l'evoluzione della vita come zona abitabile circumstellare (CHZ, da *circumstellar habitable zone*). Sebbene la sua definizione sia cambiata nel tempo, in genere la CHZ viene considerata come la regione intorno a una stella dove l'acqua liquida può mantenersi sulla superficie di un pianeta di tipo terrestre per almeno qualche miliardo di anni. La zona ha la forma di un anello. Il suo confine interno è la minima distanza a cui un pianeta può orbitare intorno alla stella senza che l'acqua degli oceani sfugga nello spazio. Nel caso più estremo, può verificarsi un effetto serra incontrollato che porta all'evaporazione degli oceani (come è accaduto su Venere). Il confine esterno è la massima distanza a cui un pianeta può orbitare senza che gli oceani gelino. Da considerazioni teoriche di base, gli astronomi possono stimare l'ampiezza della CHZ per una stella di massa qualsiasi.

Ovviamente, molti altri fattori contribuiscono all'abitabilità di un pianeta, fra cui l'ellitticità dell'orbita, la vicinanza di un grande satellite e la presenza di pianeti giganti; ma se un pianeta orbita al di fuori della zona abitabile, nessuno di questi dettagli ha probabilmente molta importanza. Così pure, non importa molto dove sia situata la CHZ se il sistema planetario nel suo complesso si trova in una regione ostile della Galassia.

Così, nel 1999, abbiamo proposto il concetto di un equivalente galattico della CHZ: la zona galattica abitabile (GHZ), la quale definisce i luoghi più ospitali della Via Lattea: né troppo vicini né troppo lontani dal centro galattico. Non siamo i primi a discutere l'abitabilità in questo contesto più ampio. Nello scorso decennio Virginia Trimble dell'Università del Maryland e dell'Università della California a Irvine pubblicò articoli sulle connessioni fra composizione chimica galattica e condizioni necessarie alla vita. Ma in anni recenti vi è stato un enorme passo in avanti: la scoperta di pianeti giganti delle dimensioni di Giove intorno a stelle di tipo solare. Non tutte le stelle di questa classe sono accompagnate da pianeti; anzi, i pianeti giganti scoperti si trovano soprattutto intorno a stelle ricche di elementi chimici più pesanti dell'elio: ciò che gli astronomi chiamano «metalli». Questa correlazione fa pensare che la metallicità sia un fattore importante per la nascita di pianeti giganti. (Anche le tecniche più perfezionate non consentono attualmente di rilevare pianeti di dimensioni terrestri.) Al tempo stesso, gli astronomi hanno acquisito una nuova consapevolezza di quanto possa essere micidiale l'ambiente della nostra galassia, ricco com'è di esplosioni stellari e di incontri stellari ravvicinati.

L'importanza dei metalli

I limiti della zona galattica abitabile sono fissati da due requisiti fondamentali: la disponibilità di materia per la costruzione di un pianeta e un'adeguata protezione dalle minacce cosmiche. La storia di come gli elementi chimici si combinarono nel formare la Terra è stata ricostruita dalla moderna scienza astronomica. Il big bang generò idrogeno, elio e poco altro. Poi, nei successivi 10 miliardi di anni, questa miscela grezza si convertì, nell'interno delle stelle, in una ricca serie di elementi. Nel mezzo interstellare il rapporto fra il numero di atomi metallici e quello di atomi di idrogeno aumentò fino a raggiungere il valore attuale.

Questi metalli sono gli elementi costitutivi dei pianeti di tipo terrestre e la loro abbondanza determina quanto sono grandi i pianeti che possono formarsi. A sua volta, la dimensione stabilisce se un pianeta sia in grado o meno di trattenere un'atmosfera e di dar corso a un'attività geologica. Per di più, senza una quantità sufficiente di metalli non possono formarsi pianeti giganti, dal momento che essi condensano intorno a un nucleo roccioso che deve avere una certa grandezza minima. Le osservazioni dei pianeti extrasolari stanno cominciando a precisare la metallicità necessaria per la costruzione di pianeti giganti. Nessun pianeta di questo tipo è stato individuato intorno a stelle con una metallicità inferiore al 40 per cento di quella solare. Uno studio pubblicato nel 2000 riferisce che lo Hubble Space Telescope non è riuscito a individuare alcun pianeta nell'ammasso globulare 47 Tucanae, le cui stelle hanno metallicità pari al 25 per cento di quella solare (si veda l'articolo *In cerca dell'ombra di altre Terre* di Laurance R. Doyle, Hans-Jörg Deeg e Timothy M. Brown in «Le Scienze» n. 387, novembre 2000).

LA ZONA ABITABILE DELLA VIA LATTEA esclude le pericolose regioni centrali e le zone esterne, povere di metalli. I limiti della zona (*in verde*) non sono ben definiti. Il rigonfiamento è indicato in giallo e le regioni attive di formazione stellare nei bracci di spirale sono in blu e rosa.

IN PILLOLE

- Che cosa occorre a un pianeta per ospitare forme di vita complesse? Gli astronomi hanno generalmente sottolineato che deve essere stabile l'acqua allo stato liquido, cosa possibile solo in un certo intervallo di distanze dalla stella: la regione chiamata zona abitabile circumstellare. Ma con la scoperta dei pianeti extrasolari, negli ultimi cinque anni, si è visto che vi è un insieme più ampio di condizioni.
- Idealmente, la stella e la sua corte planetaria dovrebbero orbitare in un certo intervallo di distanze dal centro della galassia. In regioni troppo lontane, la nube protostellare può essere priva degli elementi pesanti necessari alla formazione dei pianeti. Se invece la stella è troppo vicina al centro, pericoli come instabilità orbitali, collisioni di comete ed esplosioni stellari rischiano di compromettere fin dall'inizio l'evoluzione biologica.
- La posizione del Sole è fortuitamente ottimale. Ciò fa pensare che siamo soli nella Galassia, o quasi.

Viceversa, una metallicità troppo elevata può essere un problema. I pianeti di tipo terrestre sarebbero più grandi e, a causa dell'intensa gravità, più ricchi di composti volatili e poveri di rilievi topografici. Una simile combinazione rende probabile che essi siano completamente coperti da acqua, a detrimento della vita. Sulla Terra, infatti, la presenza sia di terre emerse sia di oceani è importante per il controllo della temperatura atmosferica e di altri processi. Un'elevata metallicità aumenta anche la densità del disco protoplanetario e induce di conseguenza lo spostamento dei pianeti giganti (si veda l'articolo *Migrazioni planetarie* di Renu Malhotra in «Le Scienze» n. 375, novembre 1999). Una conseguenza della migrazione orbitale è che eventuali corpi più piccoli, simili alla Terra, verrebbero scagliati fuori dal sistema o verso la stella: quando si muovono gli elefanti, le formiche restano schiacciate.

In uno studio pubblicato recentemente, Charles H. Lineweaver della University of New South Wales in Australia ha analizzato in che modo la formazione e la migrazione dei pianeti dipendano dalla metallicità. Egli ha supposto che la probabilità di generazione di un pianeta terrestre sia proporzionale alla metallicità della stella genitrice, perché sia l'una sia l'altro hanno avuto origine dalla stessa nube di polvere e gas. Dalle statistiche disponibili sui pianeti extrasolari, Lineweaver ha dedotto che la probabilità di migrazione dei pianeti giganti aumenta fortemente al crescere della metallicità: il fenomeno diventa inevitabile se la metallicità è pari al 300 per cento del valore solare. Sebbene i calcoli di Lineweaver siano del tutto provvisori, indicano che una metallicità vicina a quella solare potrebbe essere ottimale per la formazione di pianeti di massa terrestre in orbite stabili.

Questione di spessore

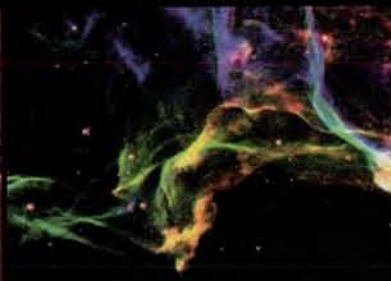
Solo una parte della Via Lattea soddisfa questo requisito. Gli astronomi di solito suddividono la nostra galassia in quattro regioni che si sovrappongono parzialmente: alone, rigonfiamento, disco spesso e disco sottile. Le stelle di ciascuna regione orbitano intorno al centro galattico esattamente come i pianeti del sistema solare orbitano intorno al Sole. L'alone e la zona più spessa del disco tendono a contenere stelle vecchie, povere di metalli; è improbabile che pianeti di tipo terrestre grandi quanto la Terra possano essersi formati intorno a esse. Le stelle del rigonfiamento mostrano invece un'ampia gamma di metallicità, ma in questa zona i livelli di radiazione cosmica sono assai elevati.

La zona sottile del disco è quella in cui si trova il Sole. Qui la metallicità del gas decresce con la distanza dal centro galattico. All'altezza del Sole, a circa 8,5 chiloparsec (28 000 anni luce) dal centro, diminuisce del 17 per cento per chiloparsec. Il logaritmo della metallicità (espresso in unità chiamate «dex», posto che il Sole abbia, per definizione, un valore pari a 0 dex) decresce linearmente con la distanza, con una pendenza di 0,07 dex per chiloparsec. Il gradiente di metallicità viene misurato a partire da caratteristiche spettrali di varie classi di stelle e nebulose. I differenti indicatori hanno iniziato a convergere sullo stesso valore solo negli ultimi tre o quattro anni, e oggi si sa che le galassie simili alla Via Lattea presentano analoghi gradienti di metallicità nel disco.

Il gradiente è una conseguenza delle differenze nella velocità di formazione stellare. A distanze via via maggiori dal centro della Galassia vi è una quantità proporzionalmente inferiore di gas e pertanto vengono generate meno stelle. Ne deriva che le regioni estreme della Via Lattea hanno accumulato meno metalli rispetto a quelle interne. Nel complesso della Galassia, la velocità di formazione stellare ha raggiunto il culmine fra 10 e 8 mi-

CIÒ CHE È BELLO è spesso pericoloso, sulla Terra come nello spazio. Alcuni dei siti più celebrati della Galassia sono inadatti alla formazione dei pianeti, per non parlare della vita. I luoghi più sicuri tendono a essere quelli più banali.

Nebulosa Trifida — gas ionizzato

Centro galattico — intensa radiazione, orbite instabili

Anello del Cigno — resti di esplosione stellare

Proplidi nella Nebulosa di Orione — vaporizzati da stelle giganti

liardi di anni fa circa, e da allora sta costantemente diminuendo. Oggi la metallicità nella zona del Sole cresce dell'8 per cento circa ogni miliardo di anni; con l'esaurirsi del gas disponibile, essa aumenterà sempre più lentamente.

Tenendo conto solo del gradiente di metallicità del disco e della sua evoluzione, possiamo porre limiti approssimati alla GHZ, sia nello spazio sia nel tempo (*si veda l'illustrazione a pagina 74*). Le stelle che si formano oggi, con una metallicità compresa fra il 60 e il 200 per cento di quella solare, generalmente si collocano a una distanza di 4,5-11,5 chiloparsec dal centro galattico: una regione che contiene solo il 20 per cento di tutte le stelle della Via Lattea. Per di più, una tipica stella delle vicinanze del Sole ha raggiunto la soglia del 60 per cento solo 5-6 miliardi di anni fa. Il Sole è del 40 per cento circa più ricco di metalli rispetto alle altre stelle originatesi nello stesso momento e nella stessa posizione del disco; questo maggiore contenuto di metalli potrebbe aver dato alla Terra un vantaggio supplementare.

GLI AUTORI

GUILLERMO GONZALEZ, DONALD BROWNLEE e PETER D. WARD condividono l'interesse per il problema dell'abitabilità dei pianeti in quanto coinvolge quasi ogni settore dell'astrofisica e della geofisica. Sono tutti e tre membri del programma di astrobiologia dell'Università di Washington, recentemente sovvenzionato dalla NASA. Gonzalez lavora alla Iowa State University; ha ottenuto il dottorato con un lavoro sulla composizione delle stelle altamente evolute negli ammassi globulari. Brownlee è uno specialista dello studio della polvere cometaria e delle meteoriti ed è responsabile scientifico della missione Stardust, il cui obiettivo è di riportare a Terra campioni di polvere cometaria nel gennaio 2006. Ward è paleontologo e studia le estinzioni di massa.

Gli astronomi hanno acquisito **una nuova consapevolezza** di quanto possa essere micidiale l'ambiente della nostra galassia.

Cortine di ferro

Una possibile obiezione è che la correlazione fra metallicità e pianeti finora rilevati non implichi un rapporto di causa ed effetto. Forse le cose vanno al contrario: non è l'alta metallicità stellare a spiegare l'esistenza dei pianeti giganti; potrebbero invece essere questi ultimi ad arricchire di metalli le stelle, nel caso vi precipitassero sopra. La maggior parte degli astronomi ritiene senz'altro che le stelle inghiottano pianeti e altri piccoli corpi; ma gli strati convettivi esterni delle stelle di tipo solare sono così massicci e ben rimescolati che esse dovrebbero divorare una quantità irragionevole di materiale planetario perché un simile processo possa spiegare l'elevata metallicità osservata nelle stelle con pianeti.

Un'altra obiezione è che la correlazione potrebbe essere un artefatto osservativo. È difficile individuare pianeti intorno a stelle povere di metalli: il principale metodo di ricerca si fonda sulle righe spettrali, che sono più deboli quando una stella ha pochi metalli. Ma l'efficienza del rilevamento non risulta pregiudicata fino a quando la metallicità della stella non scende fino a circa il 10 per cento del valore solare: ben al di sotto, quindi, della soglia del 40 per cento necessaria per la presenza di pianeti giganti. La correlazione osservata è dunque senz'altro reale.

La metallicità non è l'unico prerequisito relativo alla composizione per la formazione di pianeti abitabili; anche le abbondanze relative dei diversi elementi sono importanti. Gli elementi più abbondanti sulla Terra sono stati prodotti soprattutto nelle esplosioni di supernova. Questi fenomeni si dividono in due classi: gli eventi di tipo I, che risultano in genere dall'esplosione di una nana bianca e producono per lo più ferro, nichel e cobalto; e quelli di tipo II, che comportano l'implosione di una stella massiccia e danno origine soprattutto a ossigeno, silicio, magnesio, calcio e titanio. Fondamentale è il fatto che le supernove di tipo II siano la sola fonte naturale degli elementi più pesanti, come torio e uranio.

Poiché il processo di formazione stellare nella nostra galassia va scemando, anche il numero totale di esplosioni di supernova diminuisce, così come il rapporto fra eventi di tipo II e di tipo I. Le supernove di tipo II interessano stelle massicce di vita breve, sicché la loro frequenza segue da vicino la velocità di formazione stellare. La frequenza delle supernove di tipo I, d'altra parte, dipende dalla genesi di stelle di massa intermedia, che hanno vita più lunga, e quindi reagisce più lentamente ai cambiamenti nella velocità di formazione stellare.

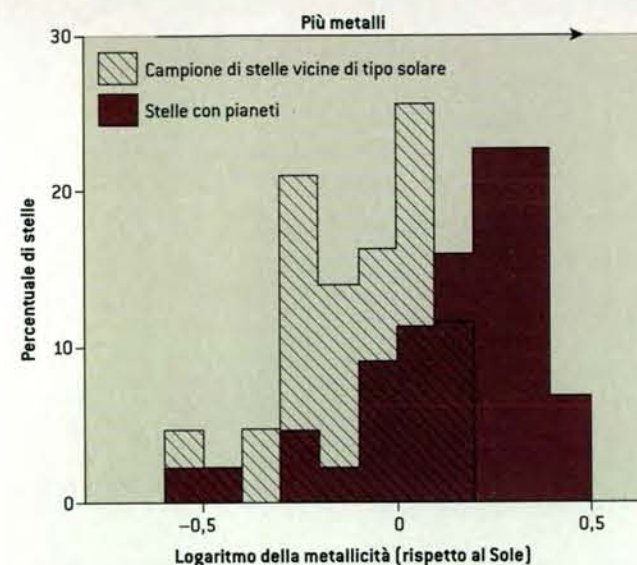
Il risultato della variazione del rapporto fra supernove è che le nuove stelle di tipo solare sono arricchite in ferro rispetto a quelle che si formarono cinque miliardi di anni fa. A parità di altre condizioni, ciò implica che un pianeta terrestre che nasca oggi avrà un nucleo ferroso proporzionalmente più grande di quello della Terra. Avrà anche, fra 4,5 miliardi di anni, circa il

Più metalli →

Campione di stelle vicine di tipo solare

Stelle con pianeti

Percentuale di stelle (0, 10, 20, 30)

Logaritmo della metallicità (rispetto al Sole) (–0,5, 0, 0,5)

L'OSSERVAZIONE DI PIANETI EXTRASOLARI ha rivelato quanto sia importante la disponibilità di «materiale da costruzione». Le stelle che possiedono pianeti giganti (*area in rosso*) tendono ad avere una concentrazione superiore di elementi pesanti rispetto alla media delle stelle vicine di tipo solare (*in nero*).

40 per cento in meno di calore generato dal decadimento di potassio, torio e uranio. Il calore prodotto da questi isotopi radioattivi è ciò che alimenta la tettonica delle zolle, la quale svolge un ruolo essenziale nel ciclo geochimico che regola la quantità di biossido di carbonio nell'atmosfera. Forse i pianeti terrestri che nascono oggi sono a «singola zolla», come Venere e Marte. L'assenza di tettonica delle zolle su Venere ha contribuito all'instaurarsi delle condizioni infernali di questo pianeta (si veda l'articolo *Cambiamenti climatici globali su Venere* di Mark A. Bullock e David H. Grinspoon in «Le Scienze» n. 369, maggio 1999). Tuttavia non comprendiamo ancora esattamente come la geologia di un pianeta dipenda dal suo flusso di calore interno.

Attenzione, pericolo

Ma anche riuscendo a riunire tutti gli elementi necessari nel posto giusto al momento giusto per costruire un pianeta terrestre, non è detto che lo si possa etichettare come «abitabile». Il pianeta deve anche essere ragionevolmente al riparo da minacce. Queste ultime si possono suddividere in due categorie: impatti di asteroidi e comete e impulsi di radiazione.

Nel sistema solare la frequenza degli impatti di asteroidi dipende dai parametri relativi alla formazione e all'orbita di Giove: il resto della Galassia non ha effetti diretti. La minaccia delle comete, invece, è legata strettamente all'ambiente galattico. Si ritiene che le comete risiedano in due «serbatoi» stabili: la fascia di Kuiper (che inizia subito oltre l'orbita di Nettuno) e la nube di Oort (che arriva fino a metà della distanza dalla stella più vicina). Altre stelle probabilmente possiedono un seguito analogo. Osservazioni nell'infrarosso di giovani stelle vicine indicano che gran parte di esse è circondata da un eccesso di polvere, compatibile con la presenza di oggetti in una fascia di Kuiper. Più recentemente, l'individuazione di vapore acqueo intorno alla stella luminosa e altamente evoluta IRC + 10216 è stata interpretata come prova dell'esistenza di comete in via di evaporazione. Variazioni nella forma di certe righe spettrali di Beta Pictoris, una stella giovane circondata da un disco di polvere, potrebbero essere provocate dalla caduta di comete.

Poiché le comete della nube di Oort sono debolmente legate al Sole, non occorre molto per deviarle verso i pianeti interni. Una spinta da parte di maree galattiche, nubi molecolari giganti o stelle di passaggio è sufficiente (si veda l'articolo *La nube di Oort* di Paul R. Weissman in «Le Scienze» n. 364, dicembre 1998). La frequenza di queste perturbazioni dipende dalla posizione nella Via Lattea. Procedendo verso il centro galattico, la densità delle stelle aumenta, e quindi anche la frequenza degli incontri ravvicinati. Per di più, un sistema planetario nato da una nube ricca di metalli probabilmente contiene più comete di uno formatosi da una nube con pochi metalli. Di conseguenza, i sistemi planetari nella Galassia interna dovrebbero essere maggiormente solcati da comete rispetto al sistema solare. Sebbene una nube di Oort esterna in un sistema del genere debba svuotarsi abbastanza rapidamente, è anche più facile che venga rifornita a partire dai serbatoi cometari interni al sistema.

Anche la radiazione di alta energia è un problema più grave nelle regioni interne della Galassia. Fino a un certo punto, il campo magnetico di un pianeta può tenere lontana la maggior parte della radiazione particellare, e il suo scudo di ozono può schermare la radiazione elettromagnetica pericolosa. Ma radiazione di energia abbastanza alta può ionizzare l'atmosfera e generare ossidi di azoto in quantità sufficiente a spazzar via lo strato di ozono. La radiazione di alta energia che colpisce l'atmosfera può anche scatenare una micidiale pioggia di particelle secondarie.

I più nocivi eventi di radiazione sono, in ordine di durata decrescente, le esplosioni dei nuclei galattici attivi, le supernove e gli impulsi di raggi gamma. Il nucleo della Via Lattea è oggi relativamente inattivo; il buco nero supermassiccio nel cuore della nostra galassia sembra essere quiescente. Ma osservazioni di altre galassie indicano che i buchi neri nel loro centro di tanto in tanto si attivano quando una stella o un ammasso stellare si av-

Una **civiltà evoluta** extraterrestre in cerca di nuovi mondi, senza dubbio, non potrebbe mancare di visitare il nostro sistema solare.

LA POSIZIONE DELLA ZONA ABITABILE è determinata da un equilibrio fra la disponibilità di materia per costruire i pianeti e la gravità delle minacce. La materia disponibile è sempre più scarsa allontanandosi dal centro galattico (*a sinistra*); anche la densità delle stelle - che comporta rischi quali esplosioni stellari e incontri ravvicinati - decresce verso la periferia (*a destra*). Un compromesso accettabile si raggiunge in posizione intermedia, anche se gli astronomi non riescono ancora a delimitare esattamente la regione abitabile.

vicinano troppo e vengono attirati e distrutti. Il risultato è un impulso fortemente energetico di radiazione elettromagnetica e di particelle. Gran parte della radiazione viene emessa in un getto lungo l'asse di rotazione della galassia, ma molte particelle cariche, seguendo le linee di forza a spirale del campo magnetico galattico, la pervadono interamente. Il luogo più a rischio durante un simile evento è il rigonfiamento galattico: non solo vi è un elevato livello globale di radiazione, ma le stelle di questa regione tendono ad avere orbite fortemente inclinate ed ellittiche che possono portarle vicino al nucleo o al getto.

Anche le supernove e gli impulsi di raggi gamma sono più minacciosi nella Galassia interna, semplicemente perché qui le stelle sono più ravvicinate. Le osservazioni dei resti di supernova mostrano che la maggior parte di queste esplosioni avviene in una zona situata al 60 per cento della distanza del Sole dal centro galattico: qui esse sono circa 1,6 volte più frequenti che nella posizione del sistema solare. La minaccia degli impulsi gamma non è ben chiara; gli astronomi non sanno che cosa induca queste esplosioni colossali o quanto sia collimata la radiazione che esse producono. Può darsi che sia solo questione di fortuna se finora abbiamo evitato un simile «raggio della morte».

La radiazione può anche annullare i presupposti per lo sviluppo di forme di vita. Le stelle di tipo solare non nascono isolate, ma sono spesso circondate da altre stelle di grande e piccola massa. Gli elevati livelli di radiazione ultravioletta emessa dalle stelle massicce erodono i dischi circumstellari delle loro vicine, riducendo la probabilità di formazione di pianeti giganti. John Bally dell'Università del Colorado a Boulder e colleghi hanno stimato che solo il 10 per cento delle stelle riesca a evitare tale sorte. Ciò potrebbe spiegare perché solo intorno al 3 per cento delle stelle vicine di tipo solare siano stati rilevati pianeti giganti.

Fine di un paradosso

Tutti questi fattori implicano che la zona abitabile sia abbastanza ampia e con limiti non ben definiti. Ma se includiamo come ulteriore requisito la prossimità al cerchio di corotazione, allora la GHZ potrebbe essere molto più piccola. Il cerchio di corotazione è il luogo in cui il periodo orbitale di una stella è eguale al periodo di rotazione dei bracci di spirale della galassia. Se una stella orbita presso il cerchio di corotazione o in corrispondenza a esso, le accade meno frequentemente di attraversare i bracci. Quando ne deve superare uno, lo fa più lentamente, ma ciò che importa è il tempo relativamente lungo che intercorre fra un attraversamento e l'altro. Misurazioni recenti della dinamica delle stelle vicine indicano che il Sole è assai prossimo al cerchio di corotazione. I bracci di spirale possono apparire affascinanti, ma è meglio ammirarli da lontano, perché gli intensi episodi di formazione stellare e le nubi molecolari giganti al loro interno moltiplicano i rischi per le forme di vita complesse.

A questo stadio delle nostre ricerche, dobbiamo ancora precisare diversi aspetti relativi alla GHZ. Ulteriori studi su comete, nuclei galattici, supernove, impulsi di raggi gamma e dinamica stellare aiuteranno a chiarire i problemi ancora aperti, ma già ora possediamo un quadro generale della GHZ. Le regioni interne della Galassia sono soggette a instabilità orbitali, impulsi di radiazione e perturbazioni cometarie. Le zone esterne sono più sicure ma, a causa della bassa metallicità, qui i pianeti terrestri sono tipicamente più piccoli. La GHZ ha l'aspetto di un anello nel disco galattico collocato pressappoco all'altezza del Sole. Occorre ricordare che la GHZ è un concetto probabilistico: non tutti i pianeti al suo interno sono abitabili (e non tutti quelli all'esterno devono essere sterili). La GHZ sta lentamente spostandosi verso l'esterno, via via che il gas interstellare raggiunge livelli di metallicità pari a quello solare.

Il concetto di GHZ ha implicazioni importanti per quanto riguarda la ricerca di intelligenze extraterrestri. Permette, per

Un sistema planetario extrasolare

Finora la ricerca di sistemi planetari extrasolari ha riservato molte brutte sorprese agli astronomi, che speravano che il nostro sistema solare fosse in qualche modo «normale». Non solo le tecniche osservative attuali permettono di individuare solo pianeti giganti, ma i circa 70 finora scoperti sono tutti su orbite molto strane, vicinissime alle loro stelle e fortemente eccentriche. Questo significa che nella zona «abitabile» di questi sistemi planetari non ci possono essere corpi rocciosi di tipo terrestre, a causa delle perturbazioni gravitazionali dei pianeti giganti. Ora però un gruppo di ricercatori dell'Università della California a Berkeley ha scoperto attorno alla stella 47 Ursae Majoris (UMa) il primo sistema planetario che presenta alcune somiglianze con il nostro. Gli astronomi hanno infatti individuato due pianeti che si trovano su orbite quasi circolari e a una distanza dalla stella che lascia spazio per piccoli pianeti rocciosi. In realtà, il primo pianeta attorno a questa stella fu scoperto già nel 1996, ma esso non spiegava completamente le osservazioni. Ora, analizzando ben 91 spettri della stella ripresi nell'arco di 13 anni, gli astronomi hanno scoperto il secondo pianeta, che è più piccolo del primo e si trova a una distanza superiore dalla stella. Anche se i due pianeti sono più grandi dei loro equivalenti solari, rispettivamente 2,5 e 0,75 volte la massa di Giove, il rapporto fra le loro masse è molto simile a quello della coppia Giove/Saturno, e lo stesso vale per il rapporto fra i periodi orbitali. Il pianeta principale di 47 UMa è su un'orbita molto più stretta di quella di Giove, a una distanza dalla stella pari a due unità astronomiche, di poco superiore a quella di Marte dal Sole. Il secondo pianeta si trova invece più lontano, come suggerisce il suo periodo orbitale di 7,1 anni. La scoperta di un simile pianeta sarebbe stata impossibile pochi anni fa, ma gli astronomi hanno ora a disposizione molti anni di dati e possono finalmente iniziare a cercare pianeti con periodi orbitali lunghi. È interessante notare che anche prima della scoperta dei due pianeti gli astronomi consideravano 47 UMa come un quasi gemello del nostro Sole.

ALDO CONTI

esempio, di identificare i siti più probabili per l'evoluzione di forme di vita complesse; già oggi possiamo dire con una certa sicurezza che gli ammassi globulari, le regioni esterne del disco e il centro galattico non sono buoni obiettivi per la ricerca.

La GHZ ha pure implicazioni nel dibattito relativo al paradosso di Fermi: se la nostra galassia è ricca di altre civiltà, dovremmo vedere qualche traccia della loro esistenza; dato che non ne vediamo, forse siamo soli. Uno degli argomenti proposti per evitare questa conclusione è che gli alieni non avrebbero alcun motivo per lasciare il loro mondo d'origine e disseminare segni della loro presenza nello spazio. Ma se le nostre idee riguardo alla GHZ sono corrette, noi viviamo in una zona della Via Lattea particolarmente desiderabile; una civiltà evoluta in cerca di nuovi mondi, senza dubbio, non potrebbe mancare di visitare il nostro sistema solare. La teoria della GHZ indebolisce anche l'argomento secondo cui la Galassia sarebbe così grande che eventuali esploratori o colonizzatori interstellari potrebbero essere andati da tutt'altra parte. La GHZ può essere grande, ma è solo una parte della Galassia, e i viaggiatori alieni tenderebbero a muoversi nell'anello anziché andare a casaccio all'esterno di esso.

Per di più, il concetto di GHZ limita l'abitabilità non solo nello spazio, ma anche nel tempo. In passato la Via Lattea era sconvolta da esplosioni di supernova e dall'attività del nucleo; solo negli ultimi cinque miliardi di anni circa le condizioni sono state propizie alla comparsa di forme di vita intelligenti, e la metallicità relativamente alta del Sole probabilmente ha dato alla Terra un vantaggio iniziale. Pertanto la GHZ potrebbe fornire una soluzione almeno parziale al paradosso di Fermi: effettivamente siamo soli, o quasi. È ovvio che queste conclusioni valgono solo per forme di vita complesse: esseri viventi più semplici, come i microrganismi, sono in grado di tollerare una gamma molto più vasta di ambienti.

L'universo nel suo complesso appare ancora meno invitante della nostra galassia. Circa l'80 per cento delle stelle nelle zone più vicine si trova in galassie meno luminose della Via Lattea. Dato che la metallicità media di una galassia è in relazione con la sua luminosità, intere galassie potrebbero essere prive di pianeti di tipo terrestre. Un altro effetto è relativo alla dinamica stellare nelle galassie. Come api che volano intorno all'alveare, le stelle in una galassia ellittica hanno orbite meno ordinate ed è pertanto più probabile che possano avventurarsi nelle rischiose regioni centrali. Per molti versi, la Via Lattea è particolarmente ospitale: è una galassia a disco con orbite ordinate, attività relativamente scarsa e abbondanza di metalli. Ma potrebbe non restarlo a lungo. Si prevede che fra tre miliardi di anni circa la galassia di Andromeda avrà un incontro ravvicinato con la Via Lattea. Questo evento perturberà le orbite regolari della maggior parte delle stelle del disco; potrebbe anche fornire nuovo combustibile al buco nero centrale della nostra galassia e causarne l'attivazione, con conseguenze forse sgradevoli per gli (eventuali) abitanti futuri della Terra.

Douglas Adams ha così spiritosamente riassunto il frutto degli ultimi secoli di progresso in astronomia: «Lontano, nelle inesplorate lande dell'inelegante estremità del braccio occidentale della Galassia, si trova una piccola stella gialla del tutto trascurabile». Ma come spesso accade, elegante non vuol dire confortevole. Noi viviamo davvero in un luogo privilegiato.

BIBLIOGRAFIA

TRIMBLE VIRGINIA, *Galactic Chemical Evolution: Implications for the Existence of Habitable Planets* in *Extraterrestrials: Where Are They?*, a cura di M. H. Hart e B. Zuckerman, Cambridge University Press, 1995.

LEWIS JOHN S., *Worlds Without End: The Exploration of Planets Known and Unknown*, Perseus Books, 1998.

TAYLOR STUART R., *Destiny or Chance: Our Solar System and Its Place in the Cosmos*, Cambridge University Press, 1998.

WARD PETER D. e BROWNLEE DONALD, *Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe*, Copernicus, 2000.

LINEWEAVER CHARLES, *An Estimate of the Age Distribution of Terrestrial Planets in the Universe: Quantifying Metallicity as a Selection Effect*, in «Icarus», 151, n. 2, 1° giugno 2001.

GONZALEZ GUILLERMO, BROWNLEE DONALD e WARD PETER D., *The Galactic Habitable Zone: Galactic Chemical Evolution*, in «Icarus», 152, n. 1, 1° luglio 2001.

LA TRANS-ALASKA PIPELINE è l'oleodotto che trasporta il petrolio estratto nell'impianto di Prudhoe Bay fino al porto di Valdez, sgombro dai ghiacci anche durante la stagione invernale.

Jim Barr

Petrolio nascosto sotto un rifugio incontaminato

L'ultimo grande giacimento petrolifero sul continente nordamericano potrebbe trovarsi al di sotto dell'ultima grande riserva naturale costiera dell'Alaska. Si tratta ora di valutare i potenziali benefici economici e i rischi ecologici di un possibile sfruttamento

di W. Wayt Gibbs
redazione di «Scientific American»

Alzandosi in volo da Deadhorse, in Alaska, e proseguendo verso ovest fino al nuovo campo petrolifero Alpine della Phillips Petroleum, si può ripercorrere come in un film al rallentatore tutta la storia dello sfruttamento petrolifero della North Slope dell'Alaska. Al decollo, la scena si apre sul gigantesco campo petrolifero da cui tutto ebbe inizio: Prudhoe Bay, scoperto nel 1968 e «stappato» nel 1977 per inviare il suo petrolio attraverso la Trans-Alaska Pipeline fino al porto di Valdez, sgombro dai ghiacci per tutto l'anno. Prendendo quota, l'aereo segue il tracciato degli oleodotti tributari che si diramano verso Kuparuk, campo petrolifero secondo solo a quello di Prudhoe tra tutti quelli scoperti finora in Nord America. Come Prudhoe, Kuparuk si è sviluppato, a partire dalla sua apertura nel 1981, in una miriade di pozzi connessi su un'estensione di 207 000 ettari da una ragnatela di strade e condutture. Completano il panorama gli impianti di trattamento, gli alloggi per il personale, i parchi di veicoli e gli scuri pozzi pieni di roccia e fango estratti in profondità. Guardando verso nord, le isole artificiali di Northstar e di Endicott sembrano quasi a ridosso della costa. E non appena l'aereo inizia la discesa sulla pista di Alpine, eccoci proiettati su quanto di più aggiornato si possa concepire in fatto di tecnologia petrolifera. Questo progetto dall'estensione di 38 ettari, quasi privo di strade, viene spesso citato come modello di sviluppo dell'industria estrattiva responsabile dal punto di vista ambientale e finanziario, e come la prova del fatto che le compagnie petrolifere hanno finalmente imparato a coesistere con i delicati ecosistemi dell'Artico. Quello di Alpine è il più nuovo e occidentale tra i campi petroliferi della North Slope alaskana, ma non conserverà per molto questi primati. Quando le sue valvole vennero aperte, nel novembre 2000, il greggio ritornava per 80 chilometri verso la stazione di pompaggio 1, presso Deadhorse - come tutto il petrolio prodotto nella North Slope - attraverso un nuovo oleodotto tributario. Ma a febbraio del 2001 la produzione complessiva del campo raggiungeva già quasi 90 000 barili al giorno, ai limiti cioè della capacità dell'oleodotto.

IL RIFUGIO ARTICO fornisce un luogo adatto alla riproduzione dei caribù. Per gli ecologisti, esso funge anche da area di controllo degli effetti ambientali dello sviluppo antropico.

Arctic National Wildlife Refuge

Questo campo è stato costruito con lo sguardo rivolto al futuro, e da Alpine il futuro dello sfruttamento degli idrocarburi della North Slope punta simultaneamente in tre direzioni. Continuerà verso ovest, nella National Petroleum Reserve dell'Alaska (NPR-A), estesa su 92 000 chilometri quadrati, con la quale il campo Alpine confina. Il Governo federale ha dato in concessione 16 000 chilometri quadrati nel 1999, e l'esplorazione ha avuto inizio lo scorso anno. Il petrolio dei nuovi campi che verranno sfruttati in quella regione sarà trasportato con l'oleodotto di Alpine.

Il futuro potrebbe vedere anche un'espansione verso sud. Lo scorso anno, il rialzo dei prezzi del petrolio ha indotto le compagnie petrolifere della North Slope a investire 75 milioni di dollari per la progettazione di un gasdotto da 10 miliardi di dollari che per la fine del decennio servirà ad aprire una strada tra 990 miliardi di metri cubi di riserve intatte di gas e gli Stati Uniti.

LA SOPRAVVIVENZA dei 250 buoi muschiati che rimangono nell'Area 1002 potrebbe essere messa in pericolo dagli spostamenti forzati a cui gli animali sarebbero costretti nel caso di installazione di nuovi impianti di estrazione del greggio.

Jim Brandenburg/Grazia Neri

Dopo il 2010, la Phillips, la BP e altri produttori di petrolio che operano in Alaska guarderanno anche a est in cerca di nuove opportunità. Neppure 50 chilometri dopo Badami, l'estremità orientale delle infrastrutture della North Slope, si trova la piana costiera coperta da chiazze di tundra della cosiddetta Area 1002. Questo nome si riferisce al numero di paragrafo dell'Alaska National Interest Lands Conservation Act del 1980 con cui si riservavano 6000 chilometri quadrati di proprietà federale, sulla base delle stime dei geologi secondo cui quest'area custodirebbe miliardi di barili di petrolio e decine di miliardi di metri cubi di gas naturale.

La stessa legge collocava l'Area 1002 nell'ambito dell'Arctic National Wildlife Refuge (ANWR), esteso su quasi 77 000 chilometri quadrati e istituito sulla base delle osservazioni dei biologi, secondo cui la pianura costiera costituisce un habitat artico di elezione: territorio di riproduzione per i caribù; zona umida per la nidificazione e il soggiorno dei cigni di tundra e di altri uccelli acquatici; territorio per orsi polari e volpi dell'Artico e anche zona di pascolo per un piccolo branco di buoi muschiati.

Il Congresso ha così dato la stura a una delle più annose controversie in materia ambientale del XX secolo, e i dardi legali hanno già cominciato a fioccare. Il 26 febbraio il senatore dell'Alaska Frank H. Murkowski ha presentato la proposta di legge S.389, che, qualora fosse approvata, aprirebbe l'Area 1002 all'esplorazione e allo sfruttamento dei giacimenti di idrocarburi. La proposta permette al Bureau of Land Management di limitare le attività così da assicurare che esse «non abbiano significativi effetti dannosi sui pesci e sulla fauna selvatica, sul loro habitat, le loro risorse di sopravvivenza e l'ambiente in generale».

Ma può bastare una normativa pur attenta a prevenire effetti del genere? Oppure anche lo sviluppo più tecnologicamente sofisticato e controllato dei campi petroliferi costituisce un rischio inaccettabile per il più vasto rifugio faunistico americano, rimasto finora così vicino alla propria condizione originaria?

È un errore porre agli scienziati que-

Un modello di grande campo petrolifero moderno

L'estrazione del petrolio dal rifugio artico richiederà almeno quattro campi petroliferi come il campo Alpine. Gli impianti di trattamento, suddivisi in moduli da 1500 tonnellate [1], sarebbero spostati su strade di ghiaccio [2], realizzate con acqua spruzzata sulla tundra gelata. Ogni piattaforma di ghiaia dello spessore di oltre 2 metri ospiterebbe fino a 60 teste di perforazione. Scavati da derrick dell'altezza di una cinquantina di metri o da torri di perforazione che inseriscono nel sottosuolo tubi flessibili montati su grandi bobine [3], i pozzi penetreranno nel permafrost ed effettueranno deviazioni per decorrere orizzontalmente attraverso le tasche di idrocarburi fino a una decina di chilometri di distanza. Più della metà dei pozzi sarà adibita all'iniezione in profondità di acqua di mare o di gas naturale, per far migrare il petrolio verso i pozzi adiacenti. Un impianto centrale di trattamento rimuoverà l'acqua e il gas e pomperà il petrolio fino a Prudhoe Bay. L'oleodotto potrebbe essere sepolto sotto l'alveo dei fiumi e sopraelevato fino a un metro e mezzo al di sopra della tundra per permettere il transito di animali. Anse spaziate con regolarità [4] serviranno ad arrestare il flusso in caso di perdite dell'oleodotto. Circa 300 persone sarebbero incaricate della gestione degli impianti. Durante l'inverno, grandi convogli con un centinaio di operatori, 8-10 veicoli per la generazione di onde sismiche [5] e una trentina di altri veicoli si aggirerebbero per la tundra gelata, effettuando profili sismici. Un altro centinaio di persone costruirebbe piattaforme di ghiaccio, collocandovi sopra trivelle da 900 tonnellate per effettuare sondaggi esplorativi [6]. Queste operazioni vanno completate prima che, con l'arrivo di aprile, il disgelo trasformi tutto in un pantano.

Illustrazione di David Fierstein; fotografie di Phillips Alaska, Inc. [1, 4, 5, 6]; e di Judy Patrick [2, 3]

IN PILLOLE

- La proposta di legge S.389 del Senato statunitense riaprirebbe la pianura costiera e le colline pedemontane dell'Arctic National Wildlife Refuge, la cosiddetta Area 1002, allo sviluppo dell'estrazione petrolifera. Una controproposta, la S.411, dichiarerebbe l'area riserva naturale intangibile.
- I geologi hanno utilizzato dati sismici del 1985 per stimare quanto petrolio e gas si trovino nel sottosuolo. Ma prima di richiedere qualunque concessione, le compagnie petrolifere dovranno raccogliere nuovi dati sismici. Ciò lascerà un reticolo di cicatrici visibili sulla vegetazione della piana costiera, ma non dovrebbe avere effetti significativi sulla fauna selvatica.
- La realizzazione di piste di ghiaccio e di pozzi esplorativi sarà il passo successivo. Pesci e uccelli acquatici soffrirebbero nel caso di un eccessivo sfruttamento dell'acqua di fiumi e laghi.
- Una rete di campi petroliferi, di impianti di trattamento e di condutture servirà alle future operazioni di estrazione. Uno sviluppo privo di piste di comunicazione potrebbe avere un impatto relativamente contenuto sulla popolazione di circa 130 000 caribù che vivono nella pianura costiera. In caso contrario gli animali verrebbero indotti a spostarsi, condizionando negativamente la loro possibilità di sopravvivenza.

stioni che li costringano a mettere sui due piatti della bilancia il valore del petrolio e quello della natura. Prima ancora di essere interpellati, 245 biologi hanno sottoscritto lo scorso novembre una lettera aperta al presidente Bill Clinton, sollecitandolo a scavalcare il Congresso e a dichiarare l'area una riserva naturale, chiudendola così alle possibilità di sfruttamento. Numerosi geologi operanti in Alaska, d'altro canto, hanno quasi unanimemente concordato sul fatto che l'industria del petrolio potrebbe espandersi senza causare nulla più che qualche danno paesaggistico. In una disputa dal carattere essenzialmente politico, l'opinione degli scienziati non dovrebbe avere peso maggiore di quella di chiunque altro.

Scienza e ingegneria dovrebbero entrare nel dibattito sui destini del rifugio artico - comunque - non come lobby, ma come fornitrici di fatti sulla base dei quali ognuno possa elaborare la propria posizione. Trent'anni di innovazione hanno portato a tecniche meno distruttive di individuazione e sfruttamento del petrolio al di sotto della tundra. E 25 anni di biologia hanno condotto all'elaborazione di modelli quantitativi che consentono di prevedere in che modo queste attività disturbino la vita in superficie. Prima di esprimersi sulla questione, il pubblico dovrebbe avere il quadro più chiaro possibile su che cosa si potrebbe guadagnare e perdere nel gioco in questione.

Che cosa c'è sotto

Almeno otto gruppi distinti di geologi hanno tentato nel corso degli anni di stimare quanto petrolio e gas si trovino al di sotto dell'Area 1002 in posizione favorevole per essere estratti con le attuali tecnologie e a costi realistici. Tutti i gruppi si sono basati su un solo insieme di dati ricavati da un rilevamento sismico condotto negli inverni del 1984 e 1985. Lunghe file di microfoni in bassa frequenza erano state poste sulla neve per captare gli echi di onde sismiche generate in superficie e riflesse da strati rocciosi a diverse profondità. Spostando la fila di microfoni, il procedimento era stato ripetuto parecchie volte, in modo da ottenere 2300 chilometri di profili incrociati che coprivano l'intera Area 1002 con una griglia dalle maglie di 10×20 chilometri circa.

La conversione di queste registrazioni in immagini del sottosuolo permette di ricostruire la geometria delle formazioni rocciose che potrebbero ospitare giacimenti di idrocarburi, per azzardare da ciò una prima stima di massima della quantità di petrolio presente. «L'estensione delle formazioni di roccia serbatoio, e delle formazioni che intrappolano il petrolio, oltre all'entità della migrazione degli idrocarburi, deve essere stimata sulla base di analogie e dell'esperienza» spiega Mark Myers, direttore della Oil and Gas Division del Department of Natural Resources dell'Alaska. Wesley K. Wallace, geologo dell'Università dell'Alaska a Fairbanks, sottolinea ancora di più l'aleatorietà di queste prime stime: «Le dimensioni della formazione, il suo spessore e la sua porosità sono tutti soggetti a un margine di errore talvolta anche molto ampio».

Non stupisce, quindi, che gli otto studi di indipendenti siano giunti a stime ampiamente divergenti. Le differenze metodologiche rendono inutile il confronto tra uno studio e l'altro. Nel complesso, però, la valutazione migliore fino a oggi è l'ultima, condotta da Kenneth J. Bird dello US Geological Survey (USGS). Dal 1996 al 1998 Bird e i membri della sua équipe hanno elaborato i vecchi dati sismici per mezzo di nuovi modelli computerizzati. Essi hanno raccolto carote e campioni di roccia da 41 fori di sonda scavati nel corso degli anni presso i margini del rifugio. Hanno osservato nuovamente gli affioramenti attraverso il permafrost di rocce con tracce di petrolio e hanno effettuato rilevamenti in corrispondenza delle montagne più vicine alla pianura costiera, dove alcuni strati - probabilmente di roccia serbatoio - risultano sollevati ed esposti. Infine hanno studiato la radioattività di certi minerali, come l'apatite, per ricostruirne la storia termica (che è determinante per la formazione del petrolio).

Il risultato di tutto questo lavoro non è una singola stima, ma diverse stime, dal momento che la cifra significativa non è quella che esprime la quantità di petrolio presente in assoluto, ma quella che determina il petrolio recuperabile a condizioni convenienti, il che dipende a sua volta dai prezzi correnti del greggio. Il gruppo di Bird ha concluso che una completa esplorazione del giacimento avrebbe presumibilmente fornito circa sette miliardi di barili di petrolio economicamente recuperabili, qualora i prezzi relativi alla North Slope fossero rimasti al di sopra dei 24 dollari al barile, come erano in marzo. La stima cade a circa 5 miliardi di barili per un prezzo intorno ai 18 dollari e precipita a poche centinaia di milioni di barili per un prezzo di circa 12 dollari. Dal 1991 il prezzo del greggio della North Slope ha fluttuato tra i 9 e i 35 dollari al barile, con una media di 18 dollari.

Con sette miliardi di barili, l'Area 1002 custodirebbe un quantitativo di petrolio pari a circa la metà di quello che si prevedeva per Prudhoe Bay nel 1977. Ma come nel caso di Prudhoe, il petrolio potrebbe essere estratto solo per alcuni decenni, e la produzione seguirebbe un classico andamento a campana. Voci interne all'industria petrolifera dicono che passeranno probabilmente 10 anni tra un'eventuale decisione di aprire il rifugio all'estrazione e l'inizio del flusso del petrolio attraverso un oleodotto. Gli studi di impatto ambientale e le udienze dureranno per un paio d'anni, se la storia di NPR-A può essere assunta come termine di riferimento. Le compagnie petrolifere avrebbero quindi un anno o due per effettuare studi sismici di maggiore dettaglio e per partecipare alle gare di appalto. Di solito per ogni scoperta di giacimento sono necessari diversi anni di esplorazioni: per esempio, dopo due

anni di trivellazioni in NPR-A, non sono ancora stati annunciati successi decisivi. Ogni sito permanente di trivellazione, ogni impianto di trattamento e ogni estensione di oleodotto devono sottostare a svariate analisi ambientali e udienze, e necessitano almeno di due o tre anni per essere realizzati.

Un'analisi della US Energy Information Administration (EIA) suggerisce che, se la stima di 7 miliardi di barili fatta dall'USGS è corretta, allora l'Area 1002 produrrà meno di 200 000 barili al giorno per i primi cinque anni di attività. L'EIA prevede inoltre che il consumo americano di petrolio, che lo scorso anno è stato di 19,5 milioni di barili al giorno, salirà a 23 milioni di barili al giorno nel 2010, e il 66 per cento di quella quantità dovrà essere importato. Al picco di produzione, probabilmente non prima del 2030, il completo sviluppo della pianura costiera del rifugio artico dovrebbe significare circa un milione di barili di petrolio al giorno. La produzione dell'Area 1002, in definitiva, coprirebbe all'incirca il 4 per cento del fabbisogno nazionale giornaliero di petrolio.

Questo è il problema

I geologi del petrolio sanno che cosa devono fare per ridurre le enormi incertezze contenute nell'analisi dell'USGS. «La prima cosa che una compagnia petrolifera dovrebbe effettuare è un nuovo rilevamento sismico in tre dimensioni» dice Myers. Data la scarsa risoluzione - inferiore ai 20 chilometri - dei precedenti profili, «ogni foro di sonda scavato sulla North Slope quest'anno sarebbe invisibile su quel rilevamento del 1985» egli osserva. Questa volta «la griglia dovrebbe essere molto più fitta», con linee distanziate di non più di 300-350 metri circa, dice Michael Faust, direttore della prospezione geofisica per la Phillips, ad Anchorage. Con nuovi dati ad alta risoluzione, i supercomputer sarebbero in grado di elaborare dettagliati modelli del sottosuolo in tre dimensioni.

La carovana di strumenti per il rilevamento, tuttavia, sarebbe abbastanza simile a quella già vista in passato: otto veicoli adibiti alla generazione delle vibrazioni e sette per la registrazione delle onde di ritorno, accompagnati dai veicoli per il trasporto del personale, altri mezzi meccanici, autocisterne, un inceneritore, una squadra di 80-120 persone e un treno di 20-25 container su pattini, trascinato da diversi trattori Caterpillar. Il personale dovrebbe partire in gennaio e rimanere sul posto fino alla fine di aprile, ritornando se necessario l'inverno successivo per coprire tutta l'area 1002, 300 metri per volta. Ogni compagnia o partnership interessata effettuerebbe il suo proprio rilevamento completo, impiegando tutta la pletora di mezzi di cui si è detto.

Questa prospettiva preoccupa Martha K. Raynolds, biologa all'Università dell'Alaska, la quale, insieme con Janet C. Jorgenson, botanica allo US Fish and Wildlife Service di Fairbanks, è ritornata sul posto sei volte per controllare 200 appezzamenti di tundra scelti a caso per uno studio dopo il passaggio degli ultimi veicoli per il rilevamento sismico, 17 anni fa.

Il 10 per cento della superficie complessiva di questi appezzamenti mostrava ancora segni di sfregamento o una ridotta copertura vegetale dopo 10 anni, e il 7 per cento (circa 160 chilometri di percorso) non si era ancora del tutto ripreso nel 1998.

Il problema, dicono le ricercatrici, è il terreno. I larghi pneumatici a bassa pressione dei veicoli per l'attivazione sismica lasciano poche tracce sui piatti terreni erbosi, gelati e ricoperti di neve, attorno a Prudhoe Bay e Alpine. I cingoli di gomma dei trattori hanno pure una presa sufficiente sul terreno. Ma a est, verso l'ANWR, la striscia pianeggiante tra le montagne e la costa si restringe e bisogna così procedere su terreno ondulato. E qui, dal momento che la gomma tende a perdere aderenza, bisogna giocoforza ricorrere a ruote dotate di ramponi, che inevitabilmente distruggono tutto ciò su cui passano.

Al disgelo, in maggio, il permafrost al di sotto delle aree compattate fonde precocemente, in quanto è privato del suo isolamento naturale. Si formano così pozze d'acqua, alcune piante indigene muoiono e altre alloctone hanno il sopravvento. Tre quarti delle cicatrici inflitte alla vegetazione erano ancora visibili in ricognizioni dall'alto un decennio dopo la campagna di esplorazione; molte sembrano essere permanenti. Ma nessuna ricerca prova che questi cambiamenti possano condizionare in qualche modo la fauna locale, dicono entrambe le ricercatrici.

Che male c'è a guardare?

Le curve sismiche generano indizi, e non scoperte. Per i geologi del petrolio, la verità emerge solo da fori scavati nel terreno. Quando i supercomputer avranno fornito le loro immagini, le squadre di prospezione si sparpaglieranno su tutta l'Area 1002 per effettuare sondaggi esplorativi. Un impianto di trivellazione mobile come quello di Alpine pesa circa 1000 tonnellate, e deve essere spostato e parcheggiato su spessi lastroni di ghiaccio ottenuti disponendo pezzetti di ghiaccio in pile dello spessore di una quindicina di centimetri e cementandoli con acqua. Con moltissima acqua, in verità: circa 2400 metri cubi per chilometro di pista. Attorno a Prudhoe, decine di migliaia di laghetti ne assicurano la disponibilità anche quando la temperatura dell'aria scende quasi a – 30 gradi Celsius. Dodici anni fa, invece, una ricerca effettuata nell'Area 1002 in aprile - quando il ghiaccio raggiunge il suo massimo spessore di poco più di due metri - rivelò solo 34 000 metri cubi di acqua liquida sequestrati in tasche di ghiaccio lungo 380 chilometri dei maggiori fiumi interni. Steve Lyons, idrologo capo per il rifugio, trovò 255 tra laghi, stagni e pozze d'acqua entro l'Area 1002. Di essi, solo 59 erano più profondi di due metri, e solo otto contenevano abbastanza acqua liquida da permettere

Una previsione sulla produzione

- Il pieno sviluppo dell'Area 1002 produrrebbe in base alle stime più attendibili circa 7 miliardi di barili di petrolio, secondo un'analisi del 1998 condotta dallo USGS. Questa stima vale solo nel caso in cui i prezzi del petrolio rimangano sopra i 24 dollari al barile. Se il rifugio fosse aperto all'esplorazione quest'anno, la produzione di petrolio avrebbe probabilmente inizio nel 2010 circa.
- Sempre secondo le analisi USGS, la produzione di petrolio salirebbe fino a raggiungere il picco attorno al 2030 (circa un milione di barili al giorno, vale a dire poco meno del 4 per cento del fabbisogno giornaliero degli Stati Uniti). Una stima indipendente di Jean Laherrère, della Petroconsultants di Ginevra, valuta però la produzione di picco in 700 000 barili al giorno.
- Il rifugio artico custodirebbe inoltre 140 milioni di metri cubi di gas naturale, secondo l'USGS. La produzione di gas richiederebbe la costruzione di un nuovo gasdotto per connettere la North Slope agli Stati Uniti.

di realizzare un paio di chilometri di pista di ghiaccio. I bacini maggiori si trovano nei delta dei fiumi Canning e Jago, e la loro acqua di fondo è spesso salmastra e quindi potenzialmente nociva per la vegetazione.

Lasciate che questi laghetti ghiaccino completamente in inverno, prevede Lyons, e l'estate prossima gli uccelli acquatici che qui stazionano durante la loro migrazione per nutrirsi degli invertebrati che vivono nelle pozze d'acqua troveranno meno da mangiare. Prelevate troppa acqua dal Canning, alimentato da sorgenti (e che scorre per tutto l'anno), e i molti tipi di pesci che vi svernano potrebbero soffrirne, egli avverte.

«L'acqua nell'ANWR potrebbe essere un problema» dice Thomas Manson, direttore ambientale ad Alpine (impianto che tratta e ricicla la sua acqua dolce, ma che comunque ne preleva 265 metri cubi ogni giorno).

Il problema non è dato solo dalla quantità, ma anche dalla distribuzione: di regola, l'acqua non viene prelevata a distanza maggiore di una quindicina di chilometri da dove deve essere utilizzata, altrimenti gela durante il trasporto. Lyons ammette che potrebbero essere escogitate soluzioni tecnologiche, come un impianto di desalinizzazione connesso a una conduttura riscaldata e sopraelevata. Ma misure come queste inciderebbero notevolmente sui costi finali dell'impresa, e quindi finirebbero con il condizionare il quantitativo di petrolio recuperabile.

La vita continua

Naturalmente, se si vuole che il petrolio venga estratto, dovranno comunque essere costruite infrastrutture. «Costruire quattro o cinque campi petroliferi delle dimensioni di quello di Alpine, con le strutture annesse, significa occupare qualche chilometro quadrato di territorio» dice Myers. «Chiaramente, una certa estensione di habitat verrà danneggiata o distrutta. La questione è: in che modo tutto questo modificherà il comportamento degli animali?»

Teoricamente, lo sviluppo dei campi petroliferi potrebbe condizionare la vita degli animali in molti modi. Le squadre di perforazione non smaltiscono più tutti i loro prodotti di rifiuto in pozzi superficiali: ora questi rifiuti vengono bruciati o iniettati in profondità nel sottosuolo. Questo riduce notevolmente l'impatto su animali come le volpi e gli orsi. Ma ci sono anche altre emissioni. Il campo di Alpine vede passare da sei a otto voli ogni giorno, e alcuni di velivoli grandi come gli Hercules C-130. Gli odori emessi da parecchi lavoratori (fino a 700) e i rumori di numerosi mezzi a motore e di due enormi turbine, grandi come i motori di un Boeing 747, si diffondono costantemente sulla tundra. Una fiamma alta tre metri splende costantemente in cima a una torre di una trentina di metri. E tre condutture - due che apportano acqua di mare e combustibile diesel, una che esporta il greggio prodotto - corrono fino all'orizzonte, e raggiungono l'altezza delle corna dei caribù. In che modo gli animali che abitano l'Area 1002 potrebbero reagire a un bell'insieme di novità come queste è un indovinello a cui i ricercatori sanno dare solo frammenti di risposta. Alcuni animali selvatici sembrano essersi spostati attorno ai campi di Prudhoe e Kuparuk. I cigni della tundra, per esempio, tendono a nidificare a più di 200 metri dalle vie di comunicazione, e i caribù tendono a starne ancor più alla larga, ad almeno quattro chilometri.

Brad Griffith dell'Institute of Arctic Biology dell'Università dell'Alaska ha recentemente individuato due importanti schemi nella distribuzione dal 1985 dei 130 000 caribù del branco Porcupine, che giunge nell'Area 1002 quasi ogni anno in giugno per il parto e lo svezzamento dei piccoli prima di partire per climi più caldi alla metà di luglio. Il primo schema è una forte correlazione tra la sopravvivenza dei piccoli e la disponibilità di cibo altamente proteico nell'area. In secondo luogo, le madri con i nuovi nati si concentrano nelle aree che diventano verdi più rapidamente (come si osserva da satellite) nel corso dell'allattamento. Scott Wolfe, un allievo di Griffith, ha mostrato lo scorso anno che il secondo schema si adatta altrettanto bene alla metà del branco Artico Centrale che pascola sulla sponda est del fiume Sagavanirktok.

Quel fiume attraversa grandi campi petroliferi, e Wolfe ha riscontrato che dal 1987 al 1995 la metà occidentale del branco ha spostato le maggiori concentrazioni di pascolo verso sud: più lontano cioè dalle zone di sviluppo petrolifero, ma anche dalle zone più ricche dal punto di vista della pastura. Ray Cameron, un altro biologo dell'Institute of Arctic Biology, teme che questo spostamento possa incidere sul numero dei caribù in misura sufficiente da essere percettibile al di sopra delle normali fluttuazioni causate dal tempo atmosferico, dai cicli degli insetti e da molti altri fattori. Per la verità finora ciò non è accaduto; con i suoi 27 000 esemplari, il branco dell'Artico Centrale è cinque volte più cospicuo di quanto non fosse nel 1978.

Ma in uno studio del 1995 Cameron e altri hanno riportato dati che mostrano come un calo di meno di 10 chilogrammi nel peso delle madri diminuirebbe la sopravvivenza dei piccoli del 20 per cento, e la fertilità del 30 per cento. Cameron ha anche seguito esemplari femmina dotati di trasmettitore, riscontrando che quelli che avevano trascorso l'estate tra i campi petroliferi avevano dato alla luce in media il 23 per cento in meno di piccoli rispetto alle loro controparti a est del fiume. Tuttavia in questo concatenamento logico manca un anello critico: la prova che i caribù, sloggiati dalle loro zone di pastura preferite, non abbiano da mangiare in quantità sufficiente.

I NUOVI CAMPI PETROLIFERI potranno essere costruiti se il Congresso degli Stati Uniti approverà una apposita legge.

Phillips Alaska, Inc.

I caribù nella ANWR potrebbero soffrire di più del branco dell'Artico Centrale, dato che qui un numero cinque volte maggiore di animali pascola in un'area estesa circa un quinto della pianura che circonda Prudhoe e Kuparuk. Con meno opportunità di nutrirsi, una più ampia quota di femmine potrebbe perdere peso e quindi dare alla luce meno piccoli. I campi petroliferi potrebbero spingere un numero maggiore di questi animali verso le colline pedemontane, dove i piccoli sarebbero più facile preda per aquile, lupi e orsi. Griffith e colleghi hanno recentemente combinato in un modello al computer immagini da satellite del territorio con dati (ottenuti con radiocollare) sullo spostamento dei caribù e dei grizzly. Questo modello indica che, spostando la concentrazione dei caribù verso le colline pedemontane, la sopravvivenza dei piccoli sarebbe ridotta del 14 per cento in media su base annua.

E la biologa del Fish and Wildlife Service Patricia Reynolds, che tiene sotto controllo i 250 buoi muschiati che vivono nell'Area 1002 fa notare che questi animali sopravvivono ai rigidissimi inverni della pianura soprattutto muovendosi poco e conservando il grasso immagazzinato. Se verrà prelevata ghiaia dai greti dei fiumi presso cui stazionano questi animali, i buoi muschiati verranno messi in fuga. Ciò sconvolgerà il loro precario equilibrio energetico, mettendo a rischio la sopravvivenza dei piccoli.

D'altro canto, se gli impianti di perforazione venissero serviti da brevi piste per velivoli anziché da reti di comunicazione terrestre, i caribù potrebbero essere meno intimoriti, subendo così spostamenti di entità minore. Inoltre i pozzi non devono più necessariamente essere trivellati sulla verticale del giacimento, cosicché gli impianti di trivellazione possono essere dislocati in modo da evitare di disturbare le macchie di vegetazione più preziose per gli animali. Tutto considerato, quindi, la fauna potrebbe adattarsi abbastanza bene allo sfruttamento. Ciò che bisogna chiedersi è se possiamo adattarci noi. La stessa scienza ha un grande interesse a preservare aree come queste per i suoi fini, afferma John W. Schoen, ricercatore della Audubon Society ad Anchorage: «Se il clima globale sta cambiando, gli effetti di questo mutamento saranno soprattutto visibili alle alte latitudini boreali, in luoghi appunto come il rifugio artico. In che modo ci sarà possibile misurare minimi cambiamenti per poter discernere quanto di essi sia da ricondurre alle attività antropiche e quanto a cicli naturali? Un modo consiste nel preservare queste aree come termine di confronto sperimentale. Il rifugio artico servirà certamente da laboratorio in questo senso. A patto - naturalmente - di rimanere incontaminato».

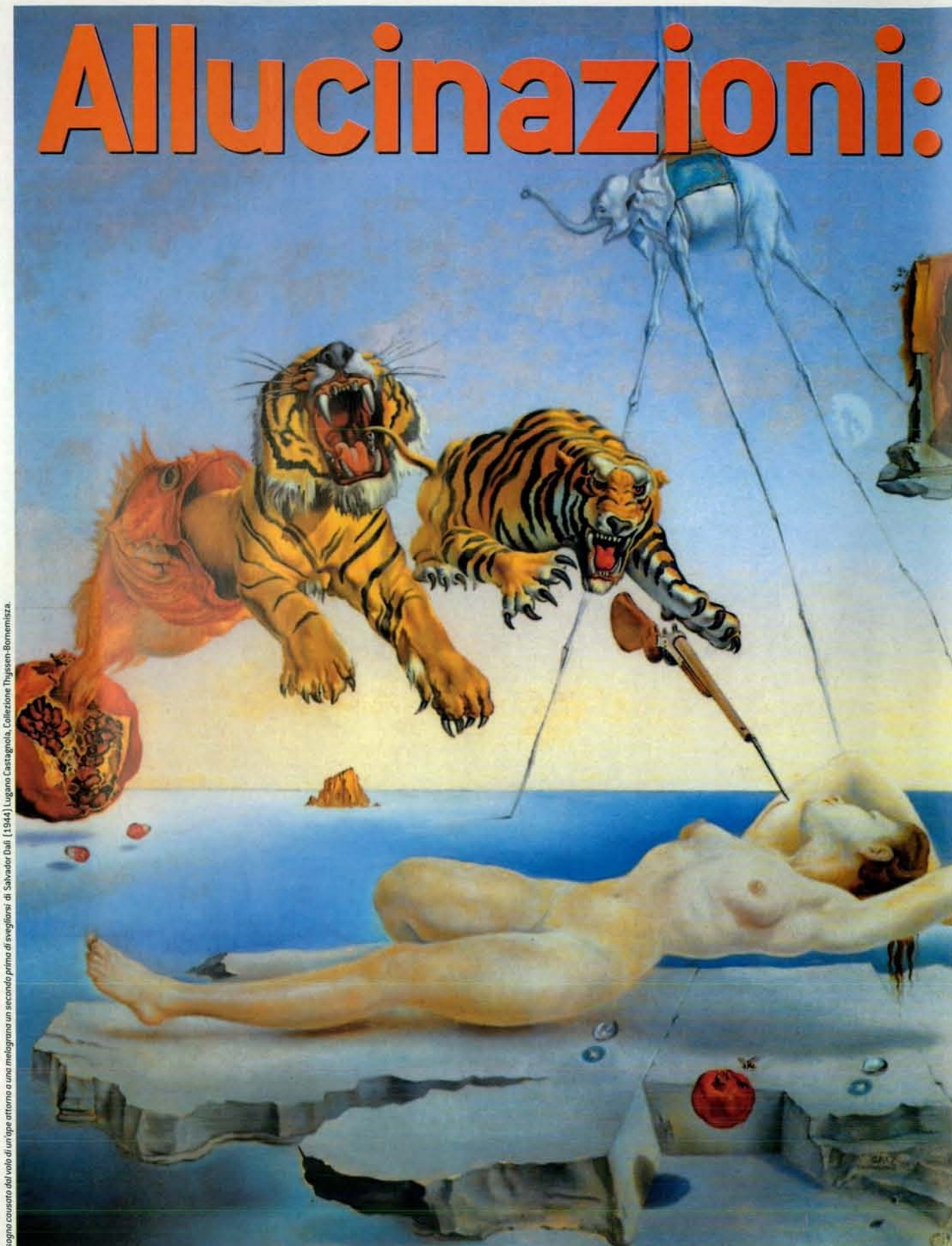
Di fatto l'Area 1002 è già il tassello centrale di un lungo ed eloquente esperimento: un esperimento politico e sociale che potrebbe finalmente avviarsi alla sua conclusione. Il modo in cui sarà risolta l'intera questione sarà assai illuminante sulle priorità dell'opinione pubblica statunitense, sulla sua pazienza e sulla sua tolleranza del rischio.

BIBLIOGRAFIA

Prevenire la prossima crisi petrolifera, sezione speciale in «Le Scienze» n. 357, maggio 1998.

The Oil and Gas Resource Potential of the Arctic National Wildlife Refuge 1002 Area, Alask,. USGS Open File Report 98-34, 1999.

TRUETT JOE C. e JOHNSON STEPHEN R. (a cura), *The Natural History of an Arctic Oil Field*, Academic Press, 2000.

Ulteriori informazioni all'indirizzo: www.sciam.com/2001/0501issue/0501gibbs/

Sogno causato dal volo di un'ape attorno a una melagrana un secondo prima di svegliarsi di Salvador Dalí (1944) Lugano Castagnola, Collezione Thyssen-Bornemisza.

di Erich Kasten

Allucinazioni: quando il cervello stravede

Alcune psicosi sono notoriamente associate ad allucinazioni, ma queste si manifestano anche in altre situazioni patologiche, e perfino in assenza di malattia. Questi fenomeni, poco conosciuti, sembrano il risultato dell'iperattività di alcune aree cerebrali in carenza di informazioni dall'esterno

Passato qualche tempo dal suo disturbo vascolare al cervello, Peter, 56 anni, cominciò a preoccuparsi. Puntini luminosi e immagini astratte continuavano a danzargli senza sosta davanti agli occhi; ma fu solo dopo molte esitazioni che osò parlarne ai suoi familiari e ai medici. Di fronte alla descrizione di questo tipo di visioni medici e psicologi diagnosticano spesso con troppa fretta una forma di follia, soprattutto la schizofrenia. Le situazioni in cui il cervello può produrre illusioni visive o uditive sono tuttavia numerose: emicranie, crisi di epilessia, per non parlare del morbo di Alzheimer o di altre malattie neurodegenerative, dell'abuso di certi farmaci, così come di alcune lesioni cerebrali. Chiunque può avere simili visioni irreali, scure o luminose, semplicemente fissando per qualche minuto un punto fisso. Speleologi ed esploratori delle immensità ghiacciate delle regioni polari, costretti a lunghi periodi di isolamento, spesso finiscono per «vedere» persone o per «sentire» voci.

Erich Kasten

Ma che cosa succede esattamente al nostro cervello? Come produce immagini che non esistono?

I meccanismi neuropsicologici alla base delle allucinazioni non sono ancora del tutto chiari, ma un modello generale del fenomeno sta prendendo forma. Solo dopo aver curato persone vittime di lesioni, di tumori o di problemi vascolari al cervello, ho capito che le allucinazioni non sono necessariamente il segno di una malattia mentale. Queste persone soffrono spesso di disturbi alla vista, ma non presentano alcun segno di malattia psichica; molti raccontano di giochi di colori o di luci, altri di immagini che si muovono disturbandoli quando vorrebbero concentrarsi su altro. Uno di questi pazienti, che qui chiamerò Peter, è diventato parzialmente cieco in seguito a un disturbo alla vascolarizzazione del cervello: il quarto superiore destro del suo campo visivo sia destro sia sinistro era oscurato. Sempre nello stesso punto all'interno di questo campo di visione cieco, egli «vedeva» allucinazioni che descriveva come «quadri di Picasso»: immagini di volta in volta concrete o astratte. Su questo sfondo apparivano oggetti che Peter aveva recentemente osservato nella parte centrale intatta del suo campo visivo. Erano soprattutto gli oggetti dai colori molto vivaci a riapparire nel campo visivo cieco, e le immagini si muovevano e si modificavano in continuazione.

Una visione, più cause

Inizialmente mi chiesi se le visioni che accompagnano le lesioni cerebrali e le psicosi risultino dagli stessi meccanismi cerebrali. Le allucinazioni appaiono in situazioni differenti, sotto forme diverse e possono coinvolgere tutti i sensi. Non si manifestano solo sotto forma visiva o sonora, ma possono anche interessare l'odorato, il gusto o le sensazioni tattili. Per identificare gli eventuali punti comuni a tutti questi fenomeni, utilizzerò il termine «allucinazione» in senso lato. Vi includo l'apparizione di oggetti immaginari, di giochi di luce e di strutture irreali. Mi limiterò inoltre ai fenomeni visivi, ma si badi bene a non confondere le allucinazioni con le illusioni ottiche, le quali sono un inganno dei sensi in cui segnali visivi sono effettivamente registrati dall'occhio, ma male interpretati dal cervello. La schizofrenia si presta particolarmente bene alla descrizione delle allucinazioni, poiché le «false percezioni» ne sono uno dei sintomi distintivi. Tuttavia, mentre gli individui con lesioni cerebrali solitamente sanno che le loro visioni non sono reali, per gli schizofrenici queste visioni corrispondono alla cruda realtà. L'impossibilità di spiegarsi queste visioni spesso provoca loro forti crisi di angoscia. Per quanto descrizioni di queste visioni si incontrino nelle scene di orrore di numerosi romanzi, la realtà resta spesso ancor più terrificante. Ronald Comer, psicologo presso la Princeton University, descriveva per esempio uno psicotico convinto di trasformasi in lupo; egli poteva addirittura «vedere» la propria trasformazione mentre si guardava in uno specchio. La stessa letteratura scientifica abbonda di descrizioni di percezioni visive irreali provocate dall'assunzione di droghe allucinogene, come l'LSD, la marijuana o la mescalina, il principio attivo del peyote (un cactus del Messico). Queste sono percezioni analoghe a quelle provate dagli psicotici. L'effetto dell'LSD (dietilammide dell'acido lisergico o lisergiammide) fu descritto per la prima volta nel 1943 dal chimico svizzero Albert Hofmann. L'LSD è un derivato semi-sintetico estratto dallo sclerozio della segale, un fungo che prolifera sulle spighe di segale.

Hofmann sperimentò per la prima volta gli effetti della sostanza mentre purificava un composto che aveva appena sintetizzato. Il giorno dopo descrisse così le sue sensazioni: «Gli occhi chiusi, in uno stato simile al sonno, percepivo un flusso ininterrotto di immagini fantastiche, di forme straordinarie e di colori intensi come in un caleidoscopio. [...] Nel mio campo visivo tutto ondeggiava, tutto era distorto, come riflesso da uno specchio deformante. I mobili assumevano forme grottesche e minacciose. La vicina, che appena riconoscevo, non era più madame R., ma una strega maligna con indosso una maschera iridescente. I cambiamenti che percepivo nel mio stesso corpo erano ancor peggiori delle trasformazioni demoniache del mondo esterno. Un demone mi aveva invaso, aveva preso possesso del mio corpo, della mia mente e della mia anima». Una delle caratteristiche delle allucinazioni provocate dalle droghe è proprio la percezione di una grandissima luminosità. Sotto l'influenza della mescalina, all'autore inglese Aldous Huxley appariva una lenta farandola di luci dorate. A queste seguivano nodi brillanti che vibravano senza sosta, per formare strutture tanto cangianti da dare l'impressione di essere «viventi». Lampi brillanti, noti come fotopsie, sopravvengono talvolta nel corso di un'emicrania o prima di una crisi epilettica. Analogamente, molte persone affette da emicranie oftalmiche vedono scotomi - macchie nere dai bordi scintillanti - che si muovono nel campo visivo e la cui taglia e forma muta nel corso della crisi. Questi fenomeni visivi assomigliano alle «aure» descritte dagli epilettici. Le allucinazioni visive possono essere il risultato di lesioni cerebrali o di numerose malattie. La loro forma (effetti luminosi, strutture astratte o immagini di oggetti o di persone) varia in funzione del tipo e dell'estensione delle lesioni. Tuttavia, anche lesioni anatomicamente simili provocano effetti piuttosto differenti.

AP Photo/Your Expedition.com, Liv Arnesen

UN PAZIENTE colpito da un disturbo vascolare cerebrale ha tentato di rappresentare le proprie allucinazioni visive mediante collage (*nella pagina a fronte in alto*). Nel campo visivo cieco scorgeva strutture ripetute su uno sfondo incorniciato da forme astratte, riprodotte a matita. Anche in situazioni di forte deprivazione sensoriale, come nel caso delle traversate artiche o antartiche (*foto a sinistra*), si possono presentare fenomeni allucinatori.

Un fenomeno più comune di quanto si creda

Nella fase acuta di un trauma cranico, di una complicazione vascolare o dell'asportazione di un tumore cerebrale, molte persone descrivono visioni. Circa il 10 per cento dei pazienti affetti da sclerosi a placche ne è colpito a determinati stadi della malattia. Un terzo degli individui colpiti dal morbo di Alzheimer soffre di allucinazioni passeggere. I bambini e gli anziani colpiti da forti febbri possono arrivare a delirare e avere allucinazioni, e anche infiammazioni cerebrali e meningiti possono provocare allucinazioni. Che alti livelli di manganese provochino lesioni nervose accompagnate da allucinazioni è noto da circa un centinaio di anni e queste visioni sono annoverate anche tra gli effetti collaterali di molti farmaci di uso comune, come il cortisone. Alcuni malati di tumore sperimentano allucinazioni quando sottoposti a radioterapia, altre persone nel corso di un'angiografia (radiografia dei vasi sanguigni del cervello che richiede l'iniezione di una sostanza per aumentare il contrasto).

Crisi di angoscia o attacchi di panico possono ugualmente suscitare allucinazioni. E per finire, alcuni tipi di intossicazione sono accompagnati da visioni irreali, causate per esempio da una disfunzione renale. La maggior parte delle persone colpite da allucinazioni non scorge che punti luminosi o lampi che attraversano il proprio campo visivo. Certi descrivono figure geometriche semplici, per esempio triangoli, cerchi o ellissi, mentre le immagini complesse e animate sono ben più rare.

Per quanto non vi sia un'associazione specifica tra una determinata allucinazione e lesioni in particolari zone cerebrali, si possono distinguere alcuni tratti caratteristici. Le allucinazioni visive semplici - per esempio, quelle che accompagnano le emi-

IN PILLOLE

- Le allucinazioni si manifestano, con varia intensità, non solo durante crisi psicotiche, ma anche durante emicranie, crisi di epilessia, o in conseguenza di lesioni cerebrali, del morbo di Alzheimer o di altre malattie neurodegenerative, dell'abuso di alcuni farmaci, e perfino in situazioni di protratto isolamento o deprivazione sensoriale.
- Impulsi nervosi sono prodotti in continuazione nell'insieme del cervello, poiché i neuroni si attivano anche spontaneamente, specie se non sono stati stimolati da diverso tempo; ma la propagazione degli impulsi spontanei è normalmente inibita dai neuroni vicini, che elaborano l'informazione reale. Inoltre la corteccia di associazione frontale, perennemente stimolata, controlla ciò che deve arrivare a livello cosciente e ciò che deve essere censurato.
- L'apparizione di immagini, di pensieri o di brandelli incoerenti di ricordi sembra quindi il risultato di uno scompenso della corteccia associativa, legato a problemi di bilanciamento dell'attività delle diverse aree cerebrali. Questi problemi possono sorgere in seguito a lesioni anatomico-funzionali, o a squilibri nel metabolismo di più neuromediatori.

cranie oftalmiche o certe crisi di epilessia - sono spesso causate da traumi alla corteccia visiva primaria o alla regione dietro il lobo occipitale. Per lungo tempo abbiamo ignorato quali fossero le lesioni in grado di suscitare la visione di forme geometriche semplici o di immagini più complesse. Fu nel 1929 a Breslavia che il neurologo Otfried Foerster descrisse come, stimolando elettricamente la corteccia visiva (l'area 17) di alcuni soggetti, questi vedessero punti, linee e cerchi. Se gli stimoli elettrici venivano concentrati su una regione limitrofa (l'area 19), responsabile delle tappe successive nell'elaborazione delle informazioni visive, ai soggetti si presentavano immagini più complesse. Ad attivare la corteccia visiva può anche essere un colpo alla testa che ci fa vedere le «stelle», perché certi neuroni sono stimolati dallo shock e il sistema visivo interpreta quest'attivazione come un segnale proveniente dagli occhi. Una lesione della corteccia visiva primaria provoca generalmente una cecità parziale. Hans Kölmel, dell'Università di Erfurt, che da più di 20 anni studia le allucinazioni provocate da lesioni cerebrali, ha dimostrato che in quasi la metà dei casi i soggetti il cui campo visivo destro e sinistro è parzialmente cieco soffrono temporaneamente di apparizioni visive. Normalmente queste apparizioni non durano più di qualche secondo, qualche minuto al massimo, e compaiono nella parte cieca del campo visivo. Ciò significa che una lesione all'emisfero sinistro induce una visione nella parte destra del campo visivo e viceversa. Kölmel ha constatato che più la lesione è estesa, maggiore è la complessità di questi stimoli visivi, siano essi lampi luminosi o forme geometriche complesse.

Le cause

Allucinazioni compaiono spesso durante la fase acuta che segue una lesione cerebrale, ma persistono raramente per più di due settimane. Kölmel le interpreta come effetti secondari di un meccanismo cerebrale di «riparazione»: dopo una lesione, le interazioni tra le varie regioni del cervello devono trovare un nuovo equilibrio poiché una riduzione di attività in una regione rischia di innescare l'iperattività di un'altra. Se il cervello non riesce a ristabilire l'equilibrio, come accade con una lesione troppo estesa, le allucinazioni possono diventare croniche; è il caso del malato che vedeva «immagini alla Picasso» e soffrì di questo disturbo per molti anni. Le lesioni della parte anteriore del cervello, ovvero della corteccia frontale o temporale, sono la fonte di allucinazioni complesse. Lo stesso paziente che vedeva le «immagini alla Picasso» era stato colpito da un disturbo vascolare cerebrale che aveva danneggiato la corteccia visiva nella regione occipitale, e che l'aveva reso parzialmente cieco. Egli aveva anche una lesione nella corteccia frontale, ed era verosimilmente questa a essere responsabile di allucinazioni così intense. Si pensa che le allucinazioni complesse siano tutte prodotte a partire da contenuti mnestici non filtrati che emergono in maniera incoerente, come ipotizzò nel 1928 lo psicologo viennese Otto Plötzl.

Qualche anno più tardi, il neurochirurgo Wilder Penfield mostrò che la capacità di immagazzinamento del nostro cervello era notevolmente superiore a quanto si fosse pensato fino ad allora. Egli fu il primo a stimolare il cervello - messo a nudo - di pazienti in stato di veglia. Il sistema nervoso è insensibile al dolore e gli era perciò possibile ridurre l'anestesia fino al punto di comunicare con il paziente con la scatola cranica aperta. Penfield poteva così stimolare elettricamente la superficie della corteccia e chiedere ai pazienti di descrivere ciò che provavano. Queste stimolazioni provocavano spesso forti allucinazioni o evocavano situazioni realmente vissute, che il paziente credeva di aver rimosso, ma che ritornavano di colpo e con grande realismo. Sulla base di queste osservazioni Penfield postulò che il cervello conserva i ricordi di tutti gli avvenimenti vissuti. Il fatto che in condizioni normali non si manifestino allucinazioni è senza dubbio dovuto alla struttura chiamata corteccia di associazione frontale. Questa regione è sempre stimolata nel corso di ogni attività cognitiva e controlla ciò che deve arrivare al cosciente e ciò che deve essere censurato. Quando per esempio ci confrontiamo con un quesito da risolvere, la corteccia associativa recupera i ricordi pertinenti e scarta le informazioni inutili.

Disegno di Hubert Airy in «Philosophical Transaction of the Royal Society», n.160, 1870

STRUTTURE caratteristiche, dai bordi luminescenti, appaiono di frequente in concomitanza di episodi di emicrania.

L'AUTORE

ERICH KASTEN è neuropsicologo presso l'Istituto di psicologia medica dell'Università di Magdeburgo.

Ricordi diversi, frammenti di pensieri e associazioni senza senso tentano in continuazione di emergere allo stato cosciente. Impulsi nervosi sono prodotti di continuo nell'insieme del cervello, poiché i neuroni si attivano spontaneamente, soprattutto quando non sono stati stimolati da diverso tempo. Altri neuroni vengono così attivati a cascata. Se tutti questi stimoli avessero un accesso incontrollato al nostro cosciente, saremmo rapidamente sommersi d'informazioni e incapaci di agire. La propagazione degli impulsi spontanei è normalmente inibita dai neuroni vicini, gli stessi che elaborano l'informazione reale.

In assenza di questa inibizione nel sistema visivo, per esempio, il soggetto vedrebbe, a seconda dei neuroni sollecitati, visioni che vanno da piccoli punti luminosi fino a una luce accecante. Quando questi segnali sono prodotti nelle aree della corteccia visiva, responsabile del riconoscimento delle forme, il paziente crede di vedere forme geometriche. Infine, quando sono le reti di neuroni deputate al riconoscimento delle persone a essere attivate incontrollatamente, sono personaggi a sfilare di fronte all'occhio «interno» del paziente. L'apparizione di immagini, di pensieri o di brandelli incoerenti di ricordi sembra quindi il risultato di uno scompenso della corteccia associativa. I soggetti con una lesione nelle aree associative della corteccia frontale sono spesso incapaci di agire ragionevolmente, di risolvere problemi semplici e di adattarsi a situazioni nuove o di concentrare la propria attenzione. L'attenzione è una delle funzioni più importanti del nostro cervello, che autorizza la selezione delle informazioni da parte della corteccia associativa: è grazie a questo meccanismo di attenzione selettiva che riusciamo ad adattare il nostro comportamento alle situazioni esterne.

Prinzhorn Collection/ Da *Beyond Reason, Art and Psychosis*, University of California Press, 1998

TESTA DI STREGA è il titolo di quest'opera di August Natterer che fa parte della Collezione Prinzhorn. Hans Prinzhorn fu uno psichiatra che fra il 1918 e il 1921 raccolse quasi 5000 opere di pazienti ricoverati in istituzioni psichiatriche nei precedenti 40 anni.
Sotto, una terracotta della cultura precolombiana di Las Remojadas, che rappresenta una donna sciamano con un fungo magico.

Stephen Jennings

Le conseguenze dell'isolamento

I medici sono persuasi che gli schizofrenici soffrano anche di disfunzioni della corteccia frontale, nella misura in cui risultano incapaci di distinguere l'importante dall'accessorio. Si riscontrano spesso tracce anatomiche di lesioni cerebrali negli schizofrenici in cui dominano sintomi di apatia e di esclusione sociale. Nei casi di schizofrenia caratterizzati da immaginazione incontrollata e allucinazioni, nelle crisi si riscontra spesso un'attività ridotta delle zone frontali e apparentemente anche delle zone temporali. Durante gli attacchi la parte frontale della corteccia è meno irrorata dal sangue e i neuroni consumano meno glucosio.

Alla lista delle possibili cause di allucinazioni - lesioni cere-

brali, psicosi, consumo di droghe - sono da aggiungere la privazione di stimoli e l'isolamento sociale. Si deduce facilmente che gli antichi metodi di trattamento che prevedevano la reclusione dei «folli» in ambienti isolati erano il contrario di ciò che si sarebbe dovuto fare. Chiunque può provare gli effetti della carenza di stimoli sensoriali con un semplice esperimento, anche se non si producono vere e proprie allucinazioni. È sufficiente concentrarsi su un punto fisso per un periodo piuttosto lungo sforzandosi di non chiudere le palpebre. Per rinnovare gli stimoli delle cellule sensoriali, l'occhio esegue continuamente piccoli scatti. Quando si sopprimono volontariamente questi movimenti, il campo visivo si riduce via via fino a formare un tunnel, e in seguito appaiono macchie che somigliano a nubi o a strutture geometriche; dopo qualche ora si hanno vere allucinazioni.

Non è tuttavia consigliabile sperimentare su se stessi una privazione completa di stimoli sensoriali come quelle praticate su volontari dallo psicologo Jürgen Aschoff, a Monaco di Baviera, o da Ronald Siegel, dell'Università di San Francisco, su se stesso. Dopo qualche ora si osservano perdita di logica, mancanza di concentrazione e depressione, e con altrettanta frequenza crisi di panico. I soggetti di Aschoff erano mantenuti svegli, sdraiati su un letto morbido in una stanza completamente insonorizzata. Siegel invece eliminava quasi ogni percezione sensoriale sdraiandosi per ore in una vasca di acqua leggermente salata, alla temperatura del corpo e posta in un ambiente poco illuminato. Ben presto scorgeva piccoli oggetti dai contorni luminosi e in seguito grattacieli futuristi fatti di luce. Con il passare del tempo gli sembrava di guardare in un tunnel da cui sgorgava una luce blu e pulsante finché non scorgeva un Buddha sorridente che esplodeva in una nube di un bianco accecante.

L'isolamento in un ambiente omogeneo e poco stimolante, come quello in cui si trovano gli esploratori polari o gli alpinisti, sembra provocare sistematicamente visioni irreali. Uno speleologo italiano che trascorse sette mesi da solo in una grotta, dopo le prime due settimane credette di veder volare un uccello, e in seguito cominciò a udire appelli di aiuto in lontananza. A un certo punto credette anche di vedere macchie colorate sul soffitto della grotta e alla fine del secondo mese gli apparvero personaggi che inizialmente sussurravano, ma finirono per conversare con lui a voce alta. Al termine di questi incontri lo speleologo salutava i suoi ospiti per quanto alcuni di essi fossero privi di testa. Molte persone che hanno perduto la vista sperimentano questo genere di allucinazioni dovute alla privazione di sensazioni visive. Privata di ogni sollecitazione, la corteccia visiva si «auto-eccita» e i non vedenti spesso gradiscono questi giochi di luci e queste immagini vivaci. Simili percezioni, note come sindrome di Charles Bonnet, sono associate a un aumento dell'attività cerebrale in una regione al di sopra della corteccia visiva primaria.

La chimica delle malattie mentali

Visioni irreali si producono anche quando si impedisce a qualcuno di sognare per più notti consecutive... o in seguito a diverse notti in bianco. Analogamente all'alcool i barbiturici, che una volta si prescrivevano come «sonniferi», con il loro effetto calmante sopprimono il sonno paradossale, e possono indurre l'apparizione di visioni immaginarie. Le persone affette da narcolessia, un disturbo caratterizzato dalla completa disorganizzazione del sonno, sono pure soggette ad allucinazioni molto intense, al punto da crederle reali. Per quanto possa essere sorprendente, gli stessi sogni sono allucinazioni, poiché di fatto le immagini sono generate dal cervello. Queste immagini appaiono quando il guardiano della zona frontale del cervello «si addormenta». Esse ci appaiono reali durante il sogno e sono probabilmente composte di frammenti di ricordi assemblati a caso.

Da tutte queste osservazioni possiamo dedurre che almeno tre regioni intervengono nella produzione di allucinazioni visive: il sistema visivo, la corteccia associativa e le strutture coinvolte nella memoria. Oggi comprendiamo solo in parte come mai, in certe circostanze, immagini memorizzate ricompaiano senza ragione. I neuroni comunicano per mezzo di messaggeri chimici, i neuromediatori, e ogni neurone è separato dal successivo da una sinapsi, la quale funge da spazio di contatto. A seconda della natura del neuromediatore, la sinapsi può avere un effetto eccitatorio o al contrario inibitorio. A ogni istante l'attività del sistema nervoso è comandata da un complesso gioco di attività eccitatorie e inibitorie esercitate dalle differenti regioni del cervello per mezzo di neuromediatori.

Oggi conosciamo quattro neuromediatori coinvolti nelle allucinazioni: dopammina, serotonina, noradrenalina (che appartiene alla classe delle monoammine) e acetilcolina. Secondo molti studi, le allucinazioni sarebbero il risultato di una deregolazione dell'equilibrio tra l'acetilcolina e i sistemi monoamminergici. L'acetilcolina sembra essere essenziale per l'attenzione, l'apprendimento e la memoria. La noradrenalina entrerebbe invece in gioco quando si tratta di distinguere ciò che è importante da ciò che non lo è. Contrariamente alla noradrenalina e alla serotonina, che non sono quasi mai liberate nella fase del sonno in cui si sogna, l'acetilcolina è rilasciata a fiotti; ciò fa attivare molte regioni cerebrali, tra cui anche quella associata al sistema visivo.

La forza dell'effetto di molte droghe è dovuta proprio alla loro analogia con alcuni neuromediatori. Queste molecole imitano i messaggeri naturali e ne prendono il posto sui recettori sinaptici. Le allucinazioni sarebbero quindi favorite da certe sostanze in grado di legarsi a diversi recettori, in particolare a quelli della serotonina, ma anche a quelli di altri neurotrasmettitori. Le molecole di alcune droghe restano legate per molto tempo: l'LSD, per esempio, permane per ore sui recettori della serotonina. Da un punto di vista chimico l'LSD, così come la psilocibina estratta da particolari funghi messicani, sono analoghi della serotonina, mentre la mescalina assomiglia alla noradrenalina e alla dopammina, benché sembri in grado di influenzare anche il sistema della serotonina. Si pensa che gli allucinogeni favoriscano le allucinazioni modificando il funzionamento del cervello. Alcuni ex-consumatori di LSD hanno raccontato che anche mesi o anni dopo aver cessato di far uso di questa droga, e senza averne assunta di nuova, hanno sperimentato stati di delirio simili a quelli provocati dall'LSD. È noto che alcune sostanze, come per esempio l'ecstasy (che non è un allucinogeno), possono provocare disturbi psichiatrici permanenti. L'ecstasy provoca un abbondante rilascio di serotonina e dopammina nell'organismo ed è proprio quest'ultima ad essere responsabile della neurotossicità della sostanza.

L'ASCESA ALL'EMPIREO di Hieronymus Bosch evoca le visioni riferite da sopravvissuti a gravi stati di coma e prodotte anche da certi allucinogeni.

Non si riesce però a spiegare l'associazione tra psicosi e allucinazioni. Si può certamente affermare che nei soggetti schizofrenici e maniaco-depressivi vi siano disturbi di alcuni sistemi di neurotrasmettitori, ma la deregolazione di un solo messaggero non provoca una psicosi perché lo stato di malattia si sviluppa solo quando vengono perturbati gli equilibri di più neuromediatori. Circa 50 anni fa alcuni medici osservarono che certe sostanze possono temporaneamente sopprimere le allucinazioni e i deliri degli schizofrenici. Queste sostanze antipsicotiche o neurolettiche bloccano i recettori cerebrali della dopammina. Si era allora postulato che la schizofrenia fosse il risultato di una perturbazione del metabolismo della dopammina. In soggetti sani alte dosi di droghe chimicamente simili alla dopammina - per esempio le anfetamine o la cocaina - provocano confusione, paura, vertigini, crisi di epilessia e allucinazioni. Per quanto il numero di recettori della dopammina sia anormalmente alto nelle persone schizofreniche, non si è però mai osservato un aumento inequivocabile dell'attività del sistema dopamminergico. L'unica certezza scientifica è quindi il disturbo nel metabolismo della dopammina, anche se le sue cause rimangono sconosciute.

Uno squilibrio di mediatori

Quello della dopammina non è però il solo circuito alterato nella schizofrenia, perché anche i sistemi della serotonina e della noradrenalina sembrano coinvolti. Nei maniaco-depressivi, nei quali si alternano fasi di euforia e di depressione, gli equili-

Quando il cervello si inganna da solo

Le visioni ci sono, ma gli stimoli esterni no. Le condizioni ambientali in cui ci troviamo o le nostre condizioni emotive o fisiche - come stress, trattamenti farmacologici o fatica estrema, quando non addirittura una condizione patologica - possono favorire l'innesco di questi fenomeni. Per quanto comunemente associate a disordini psichici, le allucinazioni interessano spesso anche individui privi di disturbi mentali. Una ricerca pubblicata nel 1996 dal «British Journal of Psychiatry» ha riscontrato che in un campione di 4972 individui il 37 per cento aveva allucinazioni nei momenti che precedevano il sonno, mentre il 12 per cento ne era interessato al risveglio.

Da un punto di vista anatomico le regioni cerebrali coinvolte variano di volta in volta a seconda dei sensi colpiti da queste false percezioni. Nel caso di un'allucinazione visiva complessa, in cui appaiono immagini intere o frammentarie, sono la corteccia visiva del lobo occipitale, la corteccia associativa del lobo frontale, responsabile dei meccanismi di attenzione, e le strutture con funzioni di memoria a interagire in maniera anomala. A livello fisiologico il sintomo più evidente è un'iperattività di queste regioni e un'alterazione delle normali concentrazioni dei quattro principali neurotrasmettitori: la dopammina, la noradrenalina, la serotonina e l'acetilcolina. Tutti agiscono sull'attività dei neuroni del lobo frontale oltre che su altre regioni del cervello. In particolare la dopammina ha un ruolo molto importante nel controllo dei movimenti, della respirazione e del battito cardiaco e nella modulazione delle risposte dell'organismo agli stimoli esterni. Una sua carenza riduce l'attività motoria, mentre una concentrazione troppo elevata può provocare contrazioni muscolari e movimenti involontari e spasmodici come avviene nei malati di morbo di Alzheimer. L'acetilcolina, i cui recettori sono abbondantissimi in tutto il cervello, è invece coinvolta soprattutto nel controllo dell'attenzione, dell'apprendimento e della memoria. Noradrenalina e serotonina svolgono un ruolo fondamentale nello sviluppo delle depressioni e in molti disturbi del comportamento come la bulimia e l'aggressività. Il ruolo della serotonina nella genesi delle allucinazioni potrebbe rivelarsi molto importante, poiché i suoi recettori possono essere facilmente saturati da diversi tipi di allucinogeni.

GUIDO ROMEO

Alcuni dei più importanti percorsi dei principali neuromediatori: la dopammina (*in rosso*), la noradrenalina (*in blu*) e la serotonina (*in giallo*).

bri di serotonina e noradrenalina appaiono ugualmente disturbati e questi soggetti soffrono spesso di allucinazioni. Secondo una delle ipotesi proposte per spiegarne i meccanismi psicopatologici, nella fase maniacale ed euforica i neuroni noradrenalinici sarebbero ipersensibili agli stimoli provenienti da tutte le derivazioni nervose che convogliano questi messaggi al cervello, mentre nella fase depressiva questi neuroni non reagirebbero più agli stimoli, come se si fossero esauriti. Il sistema noradrenalinico appare attivato in maniera anomala anche durante le crisi di angoscia, solitamente associate a minacce immaginarie.

Anche uno squilibrio fra le differenti strutture cerebrali sembrerebbe in grado di favorire la schizofrenia, soprattutto se avviene tra le strutture sottocorticali e la neocorteccia, ovvero tra gli strati filogeneticamente più antichi del cervello e quelli di origine più recente e più differenziata. Secondo Arnold Brier dell'Università di Baltimora, un aumento di attività della serotonina nelle regioni sottocorticali provocherebbe allucinazioni e deliri, mentre una sua riduzione nel lobo frontale sarebbe responsabile del ripiegamento su se stessi che si osserva in molti schizofrenici.

L'ipotesi secondo la quale è uno squilibrio tra i neuromediatori a causare allucinazioni psicotiche è confortata dalle conoscenze provenienti dallo studio di altre malattie. L'equilibrio della serotonina è per esempio disturbato quando si verifica un'emicrania. Nei soggetti affetti dal morbo di Alzheimer il controllo esercitato dalle regioni frontali del cervello, responsabili dell'attenzione e della coscienza, diminuisce, e ciò permette ai segnali provenienti da altre regioni del cervello fino ad allora inibite di prendere il sopravvento. La demenza associata alla malattia sarebbe almeno in parte dovuta alla degenerazione dei recettori dell'acetilcolina. Nel cervello di pazienti deceduti si sono riscontrate carenze molto importanti di questo neurotrasmettitore, tali da spiegare non soltanto le perdite di memoria e le difficoltà a concentrarsi, ma anche le allucinazioni che colpiscono alcuni soggetti.

L'equilibrio dei neuromediatori è alterato anche in persone che hanno sfiorato la morte e raccontano di aver visto una «luce scintillante». Questa visione è spesso preceduta dalla sensazione di aver abbandonato il proprio corpo e di osservarlo dall'alto. Scene dimenticate della propria vita solitamente seguono queste sensazioni, susseguendosi a velocità vertiginosa. Alcuni di questi soggetti ricordano addirittura paesaggi e strutture in filigrana e le loro descrizioni assomigliano molto alle sensazioni provocate dagli allucinogeni. Agli inizi degli anni ottanta i neurofisiologi avevano affermato che al momento della morte si innesca una reazione di stress accompagnata da un rilascio abbondantissimo di neuromediatori. La luce accecante che alcuni hanno potuto raccontare non sarebbe altro che una fotopsia provocata da un'eccessiva scarica di neuromediatori, mentre le altre sensazioni sarebbero allucinazioni visive complesse. Il riemergere di episodi della vita che si credevano rimossi risulterebbe dalla totale soppressione dei filtri della memoria. Grandi quantità di endorfine, sostanze oppioidi prodotte naturalmente dall'organismo, verrebbero liberate al momento della morte e questo spiegherebbe l'espressione serena che sovente si osserva nei cadaveri.

Le allucinazioni: un eccesso dell'immaginazione

Tra le false percezioni più rare, alcuni hanno descritto uno sdoppiamento del proprio corpo. In un paziente colpito da un tumore all'ipofisi, tale sdoppiamento era diventato cronico: il suo doppio imitava addirittura i suoi movimenti e le sue espressioni facciali. Gli stessi sintomi sono spesso associati a forme di emicrania, a crisi di epilessia, alla schizofrenia, alla depressione e all'abuso di droghe. In tutti questi casi l'area del cervello che genera l'immagine del doppio è probabilmente iperattiva e processi analoghi si innescano nei momenti che precedono il decesso. Due condizioni fisiologiche opposte sarebbero responsabili delle allucinazioni: nel primo caso il cervello subisce un'eccitazione eccessiva tanto da produrre i sintomi della schizofrenia, l'effetto di alcune droghe, le allucinazioni delle malattie maniaco-depressive, le crisi caratteristiche delle emicranie o dell'epilessia. Nel secondo caso il cervello invece non riceverebbe abbastanza stimoli esterni, come può accadere nel caso di lesioni cerebrali, di isolamento prolungato, di malattie neurodegenerative, o semplicemente di sonno. Alla base di questi fenomeni a mio avviso vi è sempre un'iperattività della regione cerebrale deputata alla formazione delle immagini, spesso indotta da stimoli eccessivi e talvolta anche dall'assenza di inibizioni. Questo spiega perché appaiano allucinazioni in seguito a periodi di deprivazione sensoriale in persone sane senza che vi siano lesioni cerebrali che provochino iperattività di uno dei sistemi di neuromediazione. Credo che in queste condizioni il cervello non sia abbastanza sollecitato e in qualche modo si attivi per «divertirsi».

Ma se la carenza di stimoli genera la noia, un eccesso può portare a una condizione di stress. L'intensità di uno stimolo esterno percepito come piacevole varia da individuo a individuo e dipende dal carattere di ciascuno. Per sentirsi bene le persone estroverse necessitano di più stimoli rispetto agli introversi, ma quando il flusso di informazioni esterne scende al di sotto di una soglia minima, la nostra coscienza fa appello alla memoria per sfuggire alla noia. In un primo momento ciò si produce sotto forma di pensieri e di situazioni immaginate, ma in seguito, se l'assenza di informazioni esterne è totale e prolungata, possono comparire sogni e percezioni irreali. Le allucinazioni visive o di altra natura sono dovute a un affascinante potere della nostra immaginazione.

Questa capacità del nostro cervello di visualizzare scene ci aiuta a pianificare compiti e a prendere decisioni nella vita quotidiana, ma allo stesso tempo è la sorgente di moltissime opere d'arte. I pittori «vedono» il quadro che stanno per dipingere già sulla nuda tela, così come gli architetti hanno già un'immagine di ciò che costruiranno. Queste immagini interne sono il frutto di una delle funzioni più creative del nostro cervello, la quale, quando sfugge al controllo, può sollevare il sipario delle allucinazioni.

Questi fenomeni derivano da una perturbazione degli equilibri tra le differenti aree cerebrali, ma se sono stati conservati nel corso dell'evoluzione della nostra specie viene da chiedersi quale vantaggio ci possano conferire. «Mi raccomando, non pensare a un coccodrillo!»: l'esortazione è particolarmente efficace per far apparire un coccodrillo di fronte all'occhio interno del nostro interlocutore. Questo potere di immaginazione, sicuramente una delle caratteristiche più affascinanti del cervello umano, è in grado di resistere agli ordini (come nell'esempio del coccodrillo), ma resiste talvolta anche al controllo del cervello stesso, fino a generare quelle che conosciamo come allucinazioni. Più ne approfondiamo la conoscenza, più il confine tra normale immaginazione e allucinazioni sembra attenuarsi.

BIBLIOGRAFIA

STRANGE PHILIP G., *Brain Biochemistry and Brain Disorders*, Oxford University Press, 1992.

SCHULTZ S. e ANDREASEN N., *Schizophrenia*, in «Lancet», 353, pp. 1425-1430, 1999.

PELAEZ J.R., *Towards a Neural Network Based Therapy for Hallucinatory Disorders*, in «Neural Network», 13, pp. 1047-1061, 2000.